

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

На правах рукописи

БУДНИКОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСКАТКИ И
КАЛИБРОВАНИЯ ТРУБ В ТРЕХВАЛКОВЫХ СТАНАХ ВИНТОВОЙ
ПРОКАТКИ**

Специальность 05.02.09 – «Технологии и машины обработки давлением»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Доцент к.т.н.

Е.А. Харитонов

Москва – 2020

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Особенности процессов раскатки, калибрования и оборудования трехвалковых станов винтовой прокатки.....	12
Глава 2. Исследование процесса раскатки труб и оборудования трехвалковых станов винтовой прокатки.....	23
2.1 Методика определения энергосиловых и деформационных парамет- ров процессов раскатки и калибрования.....	23
2.2 Изменение толщины стенки гильзы в зоне редуцирования.....	40
2.3 Особенности проектирования подшипниковых опор.....	43
Глава 3. Компьютерное моделирование прокатки полых заготовок на трехвалковом стане.....	55
3.1 Методика компьютерного моделирования.....	55
3.2 Исследование процесса раскатки труб.....	64
3.2.1 Исследование овальности при раскатке.....	64
3.2.2 Угол подачи.....	68
3.2.3 Угол раскатки.....	71
3.3 Исследование процесса калибрования.....	72
3.3.1 Калибровка обжимного участка.....	73
3.3.2 Угол подачи.....	75
3.3.3 Факторный анализ калибрования с повышенным обжатием по диаметру.....	76
Глава 4. Исследование и внедрение процессов раскатки и калибрования с большими обжатиями по диаметру на станах МИСиС 130 и ТПА 160 АО «ПНТЗ».....	79
4.1 Методика исследования процессов на станах МИСиС 130 и ТПА 160.....	79
4.2 Разработка калибровок валков раскатного и калибровочного станов ТПА 160.....	87

4.3	Формоизменение металла	92
4.4	Исследование геометрических размеров труб.....	101
4.5	Изменение толщины стенки.....	107
4.6	Внедрение процесса раскатки с большими обжатиями на ТПА 160.....	114
4.6.1	Промышленное опробование технологии и калибровок...	115
4.6.2	Качество труб.....	117
4.6.3	Энергосиловые параметры.....	121
4.6.4	Разработка таблицы прокатки труб.....	122
	Выводы.....	126
	Библиографический список.....	128
	Приложение 1. Акт использования результатов работы в учебной деятельности и примеры опубликованных работ.....	136
	Приложение 2. Акт промышленного опробования результатов работы и его приложение.....	142

Введение

Актуальность темы.

В современных экономических условиях возрастает потребность в трубах различного размерного и марочного сортамента, в том числе небольшими объемами. Возникает необходимость в разработке альтернативных схем прокатки труб, в том числе на уже имеющемся трубопрокатном оборудовании, которые отличаются высокой маневренностью, технологической гибкостью, надежностью.

Введенные ранее в эксплуатацию трубопрокатные агрегаты (ТПА) с раскатным станом винтовой прокатки имеют высокую значимость прежде всего потому, что на таких агрегатах получают высокоточные толстостенные трубы с допусками по наружному диаметру и толщине стенки в 2-2,5 раза более жесткими. Существующая схема прокатки труб на ТПА с раскатным станом винтовой прокатки не удовлетворяет современным технологическим и экономическим условиям, в связи с чем становится актуальным совершенствование технологии.

Степень разработанности.

Совершенствование процессов раскатки и калибрования труб осуществлено таким образом, чтобы переход на получение труб другого размерного сортамента не требовал существенных доработок в технологии и оборудовании агрегата в целом. Одним из ключевых способов решения поставленных задач на ТПА с трехвалковым раскатным станом является перераспределение деформаций между основными стадиями получения труб, а именно, повышение степени деформации гильз в раскатном стане за счет дополнительного обжатия по диаметру, и увеличение обжатия в калибровочном. Иными словами, осуществлять процессы раскатки и калибрования с повышенным обжатием по диаметру. Чтобы разработать и внедрить технологию прокатки труб с повышенным обжатием по диаметру в трехвалковом раскатном и калибровочном станах проработаны следующие вопросы:

- теоретическое и экспериментальное исследования геометрических, деформационных, энергосиловых параметров процессов винтовой раскатки и безоправочной прокатки (калибрования);
- разработана методика анализа деформационных параметров и силовых условий процессов раскатки и безоправочной прокатки с учетом овальности трубы в очаге деформации трехвалкового стана;
- разработаны технологические режимы прокатки труб широкого размерно-марочного сортамента из одного, двух типоразмеров заготовки, в том числе непрерывнолитой;
- разработаны калибровки валков раскатного и калибровочного станов ТПА-160 АО «ПНТЗ», позволяющие осуществлять раскатку и калибрование труб с увеличенным обжатием по диаметру (до 50 %);
- проработана методика определения валковых узлов трехвалковых станов, которые позволяют повысить их прочность.

Разработка новых режимов раскатки и калибрования труб с повышенным обжатием по диаметру позволит решить задачи, связанные с расширением размерно-марочного сортамента получаемых труб; повышение технологической и технической гибкости агрегата, обеспечивающей прокатку труб малыми партиями с минимальными перестройками; сократить размерный ряд исходной заготовки; расширить сортамент получаемых труб непосредственно из непрерывнолитой заготовки диаметром 156 и 220 мм.

Цель работы: совершенствование процессов раскатки и калибрования труб, позволяющее расширить технологические возможности ТПА с раскатным станом винтовой прокатки.

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

- провести теоретическое и экспериментальное исследования геометрических, деформационных, энергосиловых параметров процессов винтовой раскатки и безоправочной прокатки (калибрования);

- разработать методику анализа деформационных параметров и силовых условий процессов раскатки и безоправочной прокатки с учетом овальности трубы в очаге деформации трехвалкового стана;
- разработать технологические режимы обжатия по диаметру при прокатке труб широкого размерно-марочного сортамента из одного, двух типоразмеров заготовки, в том числе непрерывнолитой;
- разработать калибровки валков раскатного и калибровочного станов ТПА-160 АО «ПНТЗ», позволяющие осуществлять раскатку и калибрование труб с увеличенным обжатием по диаметру (до 50%);
- разработать валковые узлы трехвалковых станов повышенной конструктивной прочности для расширения сортамента прокатываемых труб.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- экспериментально и компьютерным моделированием исследовано формоизменение металла в очаге деформации трехвалкового стана винтовой прокатки при раскатке на оправке и безоправочной прокатке;
- установлена новая аналитическая зависимость контактного напряжения от диаметра рабочих валков, толщины стенки трубы, коэффициента, учитывающего влияния внешних зон при раскатке, на участках редуцирования и обжатия стенки трубы;
- исследовано распределение коэффициента овальности по длине очага деформации в зависимости от отношения диаметра к толщине стенки трубы, углов подачи и раскатки, получены новые аналитические зависимости частного обжатия от коэффициента овальности трубы;
- определена математическая зависимость между изменением толщины стенки трубы и параметрами обжимного участка очага деформации, отношения D/S , суммарного обжатия по диаметру при безоправочной винтовой прокатке;
- создана методика расчета геометрических параметров валкового узла раскатных станов винтовой прокатки, позволяющая повысить его нагрузочную способность.

Теоретическая и практическая значимость работы.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические режимы обжатия труб по диаметру при прокатке, а также калибровки рабочих валков, предназначенные для осуществления процессов раскатки и калибрования (редуцирования) с повышенным обжатием по диаметру. Новые технологические решения могут быть реализованы как автономно, так и в сочетании с существующими режимами, применяемыми на ТПА 160 АО «ПНТЗ».

Разработаны и предложены к внедрению технологические режимы прокатки труб из непрерывнолитой заготовки в условиях ТПА 160, без предварительного обжатия.

Разработаны компьютерные программы расчета энергосиловых и деформационных параметров процессов раскатки и безоправочной прокатки, а также – геометрических параметров валковых узлов трехвалковых станков.

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

Методы исследования.

Разработанная технология, выводы и рекомендации основаны на исследованиях, осуществленных с использованием экспериментальных и теоретических методов, а также математической обработки результатов и компьютерного моделирования.

При измерении геометрических параметров гильз и труб, заторможенных образцов применялся контактный мерительный инструмент. Анализ результатов экспериментального исследования включает данные по настройкам станков, геометрические параметры гильз, энергосиловые параметры, фото и видео материалы.

Обработка результатов эксперимента осуществлялась при помощи систем автоматизированного проектирования (SOLIDWORKS 3D и Компас 2D).

Компьютерное моделирование процессов раскатки и редуцирования осуществлялось в программах QFORM 3D и DEFORM 3D. Проверка адекватности результатов компьютерной модели осуществлялась на основании результатов экспериментального исследования на опытно-промышленных станках МИСиС 100Т и МИСиС 130Т и раскатном трехвалковом стане ТПА 160.

Вычислительные операции, а также разработка программ осуществлялись при помощи программ MS Excel и языков программирования Visual Basic for Application и Visual Basic .NET.

Достоверность полученных результатов была подтверждена экспериментальными исследованиями на трехвалковом стане винтовой прокатки МИСиС 130, а также проведено опытно-промышленное опробование разработанных режимов прокатки в условиях ТПА 160 АО «ПНТЗ».

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика расчета деформационных и энергосиловых параметров процесса раскатки и безоправочной прокатки;
- определение геометрических размеров труб при безоправочной прокатке с большими обжатиями.
- методика проектирования валковых узлов с повышенной грузоподъемностью подшипниковых опор.
- результаты теоретического и экспериментального исследования, в том числе с применением компьютерного моделирования в широком диапазоне изменения параметров процессов раскатки и безоправочной прокатки.
- разработанная технология прокатки труб на ТПА 160 с дополнительным обжатием гильзы (до 50 %) по диаметру при раскатке, и с обжатием черновой трубы (до 15 %) при калибровании на трехвалковом стане.
- разработанные калибровки рабочих валков раскатного и калибровочного станов, предназначенные для осуществления процессов раскатки и калибрования с повышенным обжатием по диаметру в сочетании с существующими на ТПА 160 режимами обжатия.
- результаты опытно-промышленной прокатки на ТПА 160.

Реализация результатов работы.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические режимы обжатия труб по диаметру при прокатке, а также калибровки рабочих валков, предназначенные для осуществления процессов раскатки и калибрования (редуцирования) с повышенным обжатием по диаметру. Новые технологические решения могут быть реализованы как автономно, так и в сочетании с существующими режимами, применяемыми на ТПА 160 АО «ПНТЗ».

Разработаны и предложены к внедрению технологические режимы прокатки труб из непрерывнолитой заготовки в условиях ТПА 160, без предварительного обжатия.

Разработаны компьютерные программы расчета энергосиловых и деформационных параметров процессов раскатки и безопрочной прокатки, а также – геометрических параметров валковых узлов трехвалковых станков.

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

Личный вклад:

- спланированы и осуществлены экспериментальные исследования процессов раскатки и безопрочной прокатки труб на трехвалковом стане МИСиС 130 Т, а также на раскатном и калибровочном станках ТПА 160;

- выполнено компьютерное моделирование процессов раскатки и безопрочной прокатки;

- проведен факторный анализ основных параметров и их влияние на процессы прокатки с увеличенным обжатием трубы по диаметру при раскатке и калибровании;

- разработан способ раскатки и калибрования труб с повышенным обжатием по диаметру;

- предложены калибровки валков для раскатного и калибровочного станов, позволяющие осуществлять прокатку труб по существующей технологии и с повышенным обжатием по диаметру;

- спланирована и осуществлена опытно-промышленная прокатка труб, проведен анализ формоизменения при раскатке и калибровании с повышенным обжатием по диаметру на ТПА 160.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены и обсуждены на международной, межвузовской и институтской научно-технической конференции «70-е дни науки студентов МИСиС (Москва, 2015); XI конгрессе прокатчиков (Магнитогорск, 2017); XXIII международной научно-практической конференции Трубы 2018 (Челябинск, 2018); III Международной молодежной научно-практической конференции (Магнитогорск, 2018); форуме «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm» (Москва, 2019).

Методики расчета деформационных и энергосиловых параметров процесса раскатки и калибрования труб, а также проектирования валковых узлов с повышенной прочностью, грузоподъемностью и определения максимального диаметра рабочего валка трехвалкового стана винтовой прокатки используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Разработанные калибровки валков раскатного и калибровочного станов, режимы обжатия внедрены на ТПА 160.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, из них 2 журнала входят в категорию Q3, 2 статьи, включенные в базы данных Scopus, переведены на иностранный язык (английский). Все опубликованные статьи входят в базу данных РИНЦ. По результатам работы получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, выводов и приложений, изложена на 147-ми страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 23 таблицу, библиографический список из 73 наименований.

Глава 1. Особенности процессов раскатки, калибрования и оборудования трехвалковых станов винтовой прокатки

На сегодняшний день существует большое разнообразие технологий получения горячекатаных бесшовных труб. Все они обладают комплексом преимуществ и недостатков, имеют разные характеристики и возможности.

К преимуществам трубопрокатных агрегатов (ТПА) с раскатным и калибровочным станами винтовой прокатки относят высокую точность получаемых труб по диаметру и толщине стенки [1-6]. Агрегаты с трехвалковыми станами винтовой прокатки имеют высокую манёвренность и простую перестройку с минимальными потерями времени на прокатку труб другого типоразмера [7-10], при этом нет необходимости в перевалке валков раскатного и калибровочного станом.

Применение раскатных станом винтовой прокатки на трубопрокатных агрегатах вносит определенные ограничения при получении бесшовных труб. На них можно получать толстостенные трубы с D/S менее 12 [1-3, 6]. Кроме того, существует ограничение при получении труб малого диаметра. На агрегатах с трехвалковым раскатным станом минимальный диаметр трубы составляет 50 мм. Данные недостатки могут быть решены применением редуционного стана для получения труб меньших диаметров. Также существует способ прокатки труб диаметром 40-80 мм без применения редуционного стана [2, 8], разработанный на кафедре обработки металлов давлением в МИСиС.

В современных экономических условиях возрастает потребность в бесшовных трубах различного размерного сортамента, в том числе небольшими объемами. В связи с этим, на ТПА с трехвалковым станом винтовой прокатки требуется использование широкого размерного ряда исходной заготовки [10]. Применение непрерывнолитой заготовки практически невозможно, т.к. установка непрерывной разливки не обеспечивает требуемого широкого сортамента заготовок по диаметру.

К недостаткам конструкции валкового узла трехвалковых станом можно отнести низкую стойкость подшипников [11-12]. В трехвалковом стане используются радиально-упорные конические подшипники, износ которых осуществляется неравномерно. Расширение технологических возможностей в сторону уменьшения диаметра валков требует разработки опор повышенной стойкости.

В источниках [13-15] рассмотрены различные конструкционные и технологические решения получения бесшовных труб на установках с раскатным станом винтовой прокатки, применяемые в зарубежной практике. К ним относятся:

- трехвалковый раскатной стан - речный стан;
- трехвалковый раскатной стан – автомат стан;
- трехвалковый раскатной стан – непрерывный стан;
- двухвалковый прошивной стан - трехвалковый раскатной стан;
- трехвалковый прошивной стан - трехвалковый раскатной стан;
- двухвалковый прошивной стан – стан-элонгатор - трехвалковый раскатной стан.

В таблице 1 представлены ТПА с раскатными станами и оборудование, указанные в источниках [10-15].

Развитие производства и потребность в возможности получения труб широкого размерного и марочного сортамента малыми партиями ставят новые задачи, связанные с повышением технологических и технических возможностей трубопрокатных агрегатов, в том числе с раскатным и калибровочным станом винтовой прокатки.

Таблица 1 – Трубопрокатные агрегаты

Страна / предприятие	Трубопрокатный агрегат		Параметры раскатываемой трубы	Марочный сорт-тамент
	раскатной стан	сопутствующий стан		
1	2	3	4	5
Германия / завод «Mannesman»	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	реечный стан	диаметр (40 - 260) мм длина (9 - 11) м D/S (4 - 12)	Подшипниковые, легированные и углеродистые стали
США / «Republic Steel Co»	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	непрерывный стан	диаметр (40 - 260) мм длина (9 - 11) м D/S (4 - 12)	Подшипниковые, легированные и углеродистые стали
США / «National Division»	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	автомат стан	диаметр (40 - 260) мм длина (9 - 11) м D/S (4 - 12)	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Япония / «Kainon Steel Tubes»	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	автомат стан	диаметр (40 - 260) мм длина (9 - 11) м D/S (4 - 12)	Подшипниковые, легированные и углеродистые стали
Россия / Волжский трубный завод	трехвалковый раскатной стан (Ассела) ТПА200	двухвалковый прошивной стан	диаметр (60 - 203) мм длина (3,5 - 10) м D/S (4 - 12) м	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Украина / Нижнеднепровский трубопрокатный завод	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	двухвалковый прошивной стан	диаметр (70 - 200) мм длина 3,5 - 9) м толщ (7 - 45) мм	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Россия / Первоуральский новотрубный завод	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	двухвалковый прошивной стан	диаметр (70 - 160) мм длина (3,5 - 10) м	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Англия / «Desford Tube investment»	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	Трехвалковый прошивной стан	-	-

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
США / «United States steel»	трехвалковый раскатной стан (Ассела)	Трехвалковый прошивной стан	диаметр (57 - 153) мм	
Франция / «Dujardin Montbard-Somen»	трехвалковый раскатной стан (Трансвааль)	двухвалковый прошивной стан	диаметр (54 - 210) мм длина 12 м D/S (4,5 - 15)	подшипниковые легированные и углеродистые стали
США / «babcock and Wilcox Co»	трехвалковый раскатной стан (Трансвааль)	-	диаметр (54 - 210) мм длина 12 м D/S (4,5 - 15)	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Италия завод / «Faick»	трехвалковый раскатной стан (Трансвааль)	-	диаметр (60 - 190) мм длин 12 м D/S (4 - 17)	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Испания / Завод «Tubesex»	трехвалковый раскатной стан (Трансвааль)	-	диаметр (60 - 190) мм длина 12 м	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Германия “Mannesmann Demag”	Станы Дишера	-	D/S до 23 коэффициент вытяжки (1,2 - 1,5)	подшипниковые легированные и углеродистые стали
США / «Aetna Standart”	ТПА с двухвалковым станом винтовой прокатки «АссуRoll»	прошивной стан и стан элонгатор с двумя приводными дисками	диаметр 410 мм D/S (4 -40)	подшипниковые легированные и углеродистые стали
Германия / «Schloemann Zimag» США / «Hunt Steel”	ТПА с планетарным трехвалковым станом		длина трубы (25 - 50) м D/S до 40	подшипниковые легированные и углеродистые стали

Широкое внедрение непрерывнолитых заготовок [16-17] предполагает доработку существующих технологий получения труб на таких агрегатах, расширение технологических возможностей трехвалковых раскатных и калибровочных станов.

Задачами расширения возможностей ТПА с раскатным станом являются получение широкого сортамента готовых труб при сокращении размерного ряда заготовок, а также возможность использования непрерывнолитой заготовки. Приемлемым является повышение технологических возможностей раскатного и калибровочного станов, связанных с применением более гибких условий деформирования гильз для различного сортамента получаемых труб.

К задачам расширения технологических и технических возможностей процессов и оборудования получения бесшовных труб на агрегатах с трехвалковым станом винтовой прокатки относятся:

- расширение размерного и марочного сортамента получаемых труб;
- повышение технологической и технической гибкости агрегата, обеспечивающей прокатку труб малыми партиями с минимальными перенастройками;
- сокращение размерного ряда исходной заготовки;
- расширение сортамента получаемых труб непосредственно из непрерывнолитой заготовки диаметром 156 – 220 мм.

Процесс раскатки труб с большим обжатием по диаметру на раскатном стане предполагает совмещение безоправочной прокатки и процесса раскатки на оправке, а калибрование с повышенным обжатием по диаметру, по сути является безоправочной прокаткой. В связи с этим рассмотрен ряд работ [18-29] посвященных процессу безоправочной прокатки.

Упоминание процесса редуцирования труб приведено в источнике [18]. После редуцирования на планетарном стане трубы имеют малую овальность, толщина стенки готовой трубы несколько увеличивается. Один из недостатков такого способа редуцирования – применение планетарного стана с вращающейся клетью, имеющей сложную конструкцию и одноопорные консольные

валки. Известна конструкция стационарной клетки, разработанной на ЭЗТМ, которая проще в изготовлении [18]. На таком стане возможно осуществлять редуцирование без оправки на длинной плавающей и короткой удерживаемой оправках.

В.Я. Осадчим предложена трехконусная калибровка рабочих валков и коническая оправка, позволяющая осуществлять обжатие по диаметру на 45 %, по толщине стенки на 73 % [18]. Рассмотренные способы реализуются на специальных планетарных станах, которые сложны в изготовлении и обслуживании, и не получили широкого распространения.

В работах [19-20] при разработке новой технологии прокатки труб использован редуционно-калибровочный стан винтовой прокатки, который позволяет осуществлять калибровку и редуцирование черновых труб по диаметру, а при применении оправки и по толщине стенки. Следует отметить, что процесс редуцирования или безопрывочная винтовая прокатка осуществляются в двухвалковых станах с направляющим инструментом. Это позволяет вести процесс деформирования более стабильно. Преимуществом такого способа редуцирования является использование стана, имеющего конструкцию, схожую с прошивным станом винтовой прокатки.

В работе [21] И.Н. Потапова, Б.А. Романцева, В.И. Шаманаева и др. приведены исследования процесса редуцирования в стане винтовой прокатки при различных схемах прокатки (бочковидная и чашевидная) и больших углах подачи (12° - 28°). Авторами отмечено, что наибольшее критическое значение (s/d), при котором толщина стенки существенно уменьшается наблюдается при раскатке в двухвалковом стане винтовой прокатки в валках с гребнем, развернутыми на угол подачи 24° , с направляющими дисками, а наименьшее – при раскатке в трехвалковом стане. Исследуя влияние условий редуцирования толстостенных труб с $D/S=2,5$ на измерение толщины стенки, авторами было установлено, что в области больших углов подачи толщина стенки получает практически одинаковое утонение для различных условий редуцирования. В обла-

сти малых углов подачи, как отмечают авторы, утонение стенки образцов, прокатанных на двухвалковом стане на 40-50 % больше, чем тех же образцов прокатанных на трехвалковом. При редуцировании образцов с $D/S=3-4$ стенка получила большее утолщение на двухвалковом стане.

Результаты исследований по изменению толщины стенки при калибровании и редуцировании труб на станах винтовой прокатки представлены в источниках [22-23]. В [22] приведены опытные данные по исследованию изменения толщины стенки труб, полученные А.З. Глейбергом при винтовой прокатке без оправки с различными обжатиями по диаметру и при различных углах подачи. Уменьшение толщины стенки происходит тем более интенсивно, чем более толстостенной является гильза, а также с уменьшением угла подачи и увеличением степени редуцирования. Было установлено, что при прокате гильз с $D/S=5$ стенка гильзы начинает уменьшаться при угле подачи 9° и степени редуцирования 16-20 %. При уменьшении угла подачи до 1° , толщина стенки таких же гильз при той же степени редуцирования увеличивается. При уменьшении угла подачи интенсивность изменения толщины стенки снижается. Уменьшение толщины стенки наблюдается при прокатке гильз с D/S менее 4 со степенью редуцирования 20 %.

В исследованиях процесса редуцирования, описанных в способе производства осботолстостенных труб [24] показано влияние отношения S/D (или D/S) исходной гильзы на истинную (логарифмическую) деформацию в осевом, тангенциальном и радиальном направлениях. В результате анализа экспериментальных данных авторами установлено, что явление увеличения толщины стенки происходит при отношении S/D исходной полой заготовки менее 20 % или D/S более 5, в противном случае наблюдается уменьшение толщины стенки. Экспериментальные данные, полученные при исследовании, показывают, что при прокатке гильз с $S/D = 10-15$ % ($D/S = 7 - 10$) средняя логарифмическая деформация в тангенциальном направлении по модулю выше, чем осевая. В связи с этим логарифмическая деформация в радиальном направле-

нии положительная, и толщина стенки при этом увеличивается. Прокатка толстостенных гильз с S/D более 20 % сопровождается отрицательной логарифмической деформацией в радиальном направлении, в результате чего толщина стенки уменьшается. Можно отметить, что явление уменьшения толщины стенки при безоправочной винтовой прокатке наступает в случае, когда логарифмическая деформация в тангенциальном направлении по модулю больше, чем в осевом, что характерно для прокатки особотолстостенных труб.

Известен способ безоправочного редуцирования в стане винтовой прокатки [25]. В ходе проведения исследования авторами было установлено, что с увеличением отношения D/S , при прокатки более тонкостенных труб, и с увеличением обжатия по диаметру возникает риск потери устойчивости и образование их граненности. Увеличение частоты вращения валков приводит к распространению гранёности на большую длину.

В работе [26] отмечено влияние угла подачи и схемы прокатки труб, а также влияние отношения D/S исходной трубы на стабильность процесса редуцирования и разностенность получаемых труб. Исследования проводились при прокатке гильз с D/S равным 7-25 по бочковидной схеме с углом раскатки 0° , чашевидной с углом -2° , -4° , -6° и грибовидной с углом 2° , 4° , 6° . Было установлено, что потеря устойчивости и образование граненности труб наиболее вероятны при прокатке тонкостенных гильз с $D/S = 16-25$ по грибовидной схеме. Авторы рекомендуют устанавливать меньшие значения углов подачи, а процесс редуцирования осуществлять по чашевидной схеме.

Влияние суммарного обжатия по диаметру на увеличение точности труб по толщине стенки рассмотрено в работе [25], где проведены результаты экспериментальной прокатки гильз с отношением D/S равным 5 и 10. Суммарное обжатие по диаметру выбрано в пределах 5 – 50 %. Исходные гильзы имели различную разностенность равную 10, 20 и 30 %. Авторами отмечено следующее положительное влияние на точность получаемых труб по толщине стенки:

- безоправочная винтовая прокатка (редуцирование) снижает разностенность труб по отношению к исходным гильзам, причем чем больше обжатие гильзы, тем больше снижения разностенности;

- чем больше разностенность исходных толстостенных гильз, тем более значительного уменьшения разностенности можно достичь.

В работах [25-26] представлены результаты экспериментальных исследований, в которых отмечено влияние угла подачи, схемы раскатки, отношения D/S исходной гильзы на изменение толщины стенки трубы. Предложены рекомендации по выбору режимов. Однако, в работах не проведено факторного исследования, в результате чего трудно выбрать значимый фактор и подобрать рациональные границы варьирования углов подачи, отношения D/S исходной полой заготовки, схемы прокатки.

Процесс безоправочной винтовой прокатки предлагается применять для редуцирования толстостенных труб. В зарубежной практике известны способы редуцирования особтолстостенных труб, описанные в работах [27-28]. Авторы отмечают, что данным способом можно получать толстостенные и особтолстостенные трубы с отношением D/S менее 3,0-4,5 с сохранением (или с незначительным изменением) исходной толщины стенки. В отличие от редуцированных станом продольной прокатки не происходит гранения внутренней поверхности трубы. Для осуществления данных способов предлагается использовать трехвалковый стан винтовой прокатки.

Авторами изобретения, описанного в источнике [27], предлагается использовать валки, имеющие гребень с углом наклона образующей к оси прокатки 40° . Данный способ позволяет осуществлять безоправочную прокатку с обжатием по диаметру 5-31 %. В рассмотренных способах не раскрыто влияние калибровки рабочего валка на процесс безоправочной прокатки, что осложняет оценку преимуществ предложенной калибровки валков, имеющих гребень.

Исследование безоправочной прокатки особотолстостенных труб описано в работе [28], где представлены результаты влияния углов подачи и раскатки на внутренний диаметр готовых труб-штанг, а также приведено сравнение точности геометрических размеров полых штанг. В работе отмечено, что точность геометрических размеров получаемых толстостенных труб (штанг) гораздо выше, чем при продольной прокатке.

Процесс редуцирования труб без оправки в стане винтовой прокатки известен как в отечественной, так и в зарубежной практике трубопрокатного производства. Многие исследователи [22-26] отмечают основные преимущества данного способа, а именно высокую маневренность, уменьшение разностенности и высокую точность по диаметру получаемых труб. Однако, процесс безоправочной прокатки труб в станах винтовой прокатки малоизучен и требует дополнительных исследований. Так, авторы работы [26] отмечают потерю устойчивости профиля трубы в процессе безоправочной прокатки и образование граненности при прокатке тонкостенных гильз с повышенными обжатием по диаметру. Нет исследований формоизменения и деформационных параметров, которые позволяют наиболее рационально подобрать условия деформирования.

Процесс раскатки на оправке осуществляются с редуцированием до 5 % для посадки внутренней поверхности гильзы на оправку [3-6]. Это обусловлено тем, что для каждого типоразмера используется один тип заготовки, что в условиях планового производства было приемлемым. В связи с этим повышение величины обжатия по диаметру при раскатке не предусмотрено. На основе проведенного обзора способов безоправочной прокатки, в настоящей работе предложено применение процесса раскатки на оправке с повышенным обжатием по диаметру, который позволит решить проблемы, связанные с изменением толщины стенки, повысить качество внутренней поверхности. Наличие оправки дает возможность выравнивать внутреннюю поверхность гильзы, гарантировать получение необходимой толщины стенки. Оправка дает

возможность повысить жесткость процесса раскатки с дополнительным обжатием по диаметру, тем самым исключить образование гранения. Дополнительно применение безоправочной прокатки труб в калибровочном стане позволит существенно расширить технологические возможности агрегата.

Чтобы разработать и внедрить технологию прокатки труб с повышенным обжатием по диаметру в трехвалковом раскатном и калибровочном станках необходимо решить ряд технических и технологических задач, к которым относятся:

разработка технологических режимов, обеспечивающих возможность производства широкого размерного ряда труб из одного типоразмера заготовки, в том числе непрерывнолитой;

- теоретическое и экспериментальное исследования геометрических, деформационных, энергосиловых параметров процессов винтовой раскатки и безоправочной прокатки (калибрования);

- разработка калибровок валков раскатного и калибровочного станков, позволяющих увеличить обжатие по диаметру при раскатке и калибровании труб, а также осуществлять раскатку и калибрование труб по существующим режимам на ТПА 160 АО «ПНТЗ»;

- разработка конструкции валковых узлов для расширения сортамента прокатываемых труб.

Глава 2. Исследование процесса раскатки труб и оборудования трехвалковых станов винтовой прокатки

2.1 Методика определения энергосиловых и деформационных параметров процессов раскатки и калибрования

Повышение технологичности производства труб на трубопрокатных агрегатах со станами винтовой прокатки возможно за счет применения новых режимов процесса прокатки с повышенными обжатиями гильз и черновых труб по диаметру. Разработка новых технологических режимов и оборудования невозможна без расчета усилия, которое нужно приложить к деформируемому телу для преодоления сопротивления деформации. В связи с этим, необходимо осуществить исследование энергосиловых параметров процессов раскатки и калибрования в трехвалковых станах винтовой прокатки.

Принцип определения деформирующей силы или силы, действующей со стороны металла на валок, для процессов обработки металлов давлением и, в частности, прокатки впервые был рассмотрен И.М. Павловым [29] и обобщен С.И. Губкиным [30]. Для определения деформирующей силы необходимо рассчитать удельное усилие (давление) металла на валок, а также площадь контактной поверхности металла с валком. В работах А.Д. Томленова [31], П.К. Тетерина [32] и А.И. Целикова [33], предложены методики определения удельного усилия металла на валок при поперечной прокатке и винтовой прошивке. В работах А.И. Целикова рассмотрен способ определения ширины и площади контактной поверхности. В работах [34-35] представлено исследование поперечной и поперечно-винтовой прокатки, исследование удельного давления. Однако, в указанных методиках, в основном, детально разобраны способы применительно к винтовой прошивке и поперечной прокатке.

Существует несколько аналитических методов определения усилий металла на валок в процессе винтовой прокатки. Метод характеристик или линий скольжения [36] применяется в работах А.А. Королева, П.К. Тетерина и А.И.

Целикова, а также ряда других авторов данный метод рассматривается для решения различных задач обработки металлов давлением [37-40].

Для решения задачи по определению среднего удельного усилия в зоне редуцирования и в зоне обжатия применяется метод, представленный в работе А.И. Целикова. Рассмотрен случай сжатия полого цилиндрического образца с внешним и внутренним радиусами, равными соответственно R и r . Если пренебречь деформацией в направлении оси полого цилиндра, напряженное состояние можно представить полем линии скольжения (рисунок 1).

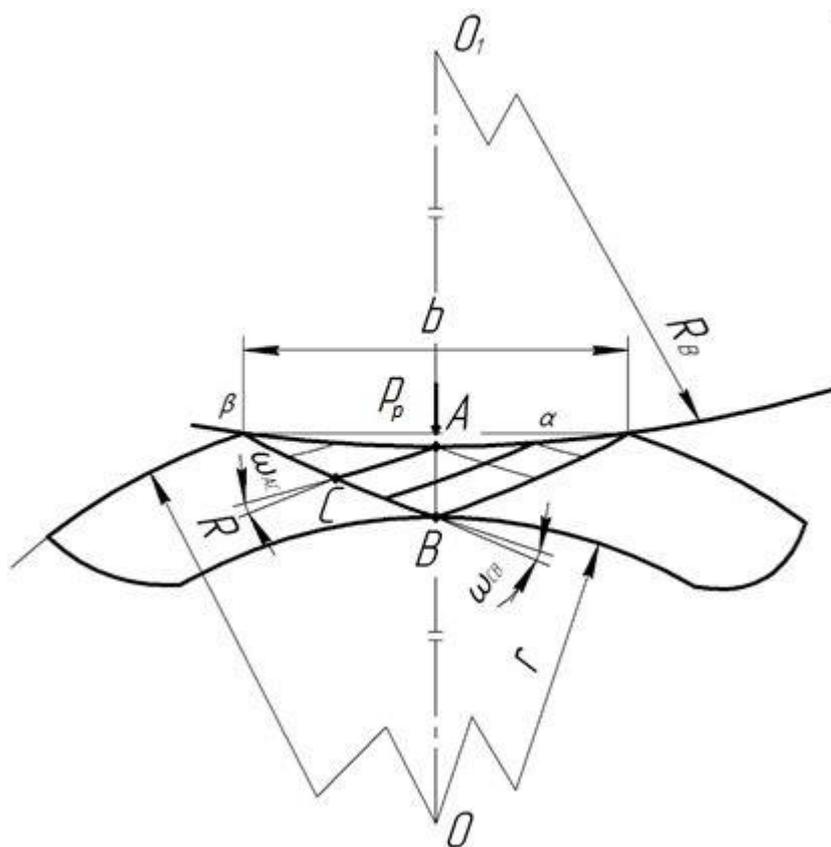


Рисунок 1 – Поле линий скольжения в зоне редуцирования

Цилиндр нагружен усилием p_p , соответствующим усилию в зоне редуцирования по внешнему контуру на некоторой ширине поверхности, равной b_p , которая характеризует ширину контактной поверхности металла с валком в зоне редуцирования. По толщине стенки полого цилиндра возникают сжи-

мающие радиальные и растягивающие тангенциальные напряжения. Расположение точки B указывает на глубину проникновения пластических деформаций, и зависит от ширины контактной поверхности [32-33, 36]. Точки A , B и C находятся на пересечениях линий скольжения семейства α и β . Применив теорему Генки [36, 44] получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_A - \sigma_C = -2k\omega_{AC} \\ \sigma_C - \sigma_B = 2k\omega_{CB} \end{cases} \quad (1)$$

где σ_A , σ_B , σ_C – средние напряжения в точках A , B и C ;

ω_{AC} , ω_{CB} – углы поворота линий скольжения между точками A и C , B и C соответственно.

Величина сопротивления деформации при чистом сдвиге – k равна половине фактического значения сопротивления пластической деформации металла при двухмерном простом сжатии – σ_Φ , [33, 36, 41] величина σ_Φ изменяется в зависимости от температуры раскатки, степени деформации и ее скорости.

С учетом свойств линий скольжения, средние значения напряжений в точках A и B связаны соотношением (2):

$$\sigma_A - \sigma_B = \sigma_\Phi(\omega_{AC} - \omega_{CB}) = 4kW \quad (2)$$

где $\omega_{AC} = -\omega_{CB} = W$.

С учетом $\sigma_B = 0$, а также условия пластичности получается уравнение (3)

$$p_p - \sigma_\Phi \left(1 + \frac{2}{S} \int_0^s W dx \right) = 0 \quad (3)$$

где S – толщина стенки полого цилиндра

Траектории линий скольжения согласно работе А.Н. Никулина [42] можно описать уравнением логарифмической кривой с радиусом основания равным радиусу валка R_B . Тогда угол W определяется уравнением:

$$W = \ln \left(\frac{x}{R_B} + 1 \right) \quad (4)$$

Решая уравнение (3) относительно p_p получается уравнение для определения удельного усилия в зоне редуцирования:

$$p_p = \mu \cdot \sigma_\Phi \cdot n''_\sigma \left[\left(2 + \frac{1}{S} D_B \right) \ln \left(2S \frac{1}{D_B} + 1 \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Где D_B – диаметр валка, мм;

S – толщина стенки раската, мм;

μ – коэффициент схемы напряженного состояния равный 1,15 [30, 36, 43];

n''_σ – коэффициент, учитывающий влияние внешних зон при раскатке труб, может меняться от 1,18 до 1,36 [43-46].

σ_Φ – сопротивление металла пластической деформации, МПа

Удельную силу металла на валок в различных точках очага деформации трехвалкового раскатного стана можно определить при помощи компьютерного моделирования, в основу которого положен метод конечных элементов [36, 45-46]. Компьютерное моделирование процесса раскатки гильз подробно разобрано в третьей главе. Моделирование раскатки гильзы в трубу с соотношением диаметра к толщине стенки D/S равным 7, 8, 10, 12 из стали ШХ15 при температуре 1100 °С было проведено с использованием программного комплекса DEFORM. В таблице 2 представлены геометрические размеры исход-

ных гильз, получаемых труб и среднее значение удельных усилий в зоне редуцирования – p_p и в зоне обжатия по толщине стенки – p_c . Подробно исследование описано в статье [47].

Таблица 2 – Параметры моделирования раскатки труб из стали ШХ15 при температуре 1100°C

Параметры трубы			Параметры гильзы, мм		p_p , МПа	p_c , МПа	p_p/p_c
D/S	Диаметр D_T , мм	Толщина стенки S_T , мм	Диаметр D_G	Толщина стенки S_G			
7	86,0	12,0	122,0	28,0	103	132	0,78
8	150,0	18,8	179,4	33,5	107	133	0,80
10		15,0	179,2	29,6	88	130	0,67
12		12,5	181,8	28,0	93	123	0,73

В работе М.А. Минтаханова [48] представлены данные тензометрического исследования деформирующей силы или силы, действующей со стороны металла на валок. Измерения силы проводились с помощью месдоз, установленных на трехвалковом раскатном стане. Сила металла на валок, полученная при помощи месдозы в процессе раскатки труб диаметром 83-88 мм с $D/S = 6-8$, из гильз диаметром 125–120 мм составляет 600–610 кН. Сила, действующая со стороны металла на валок, полученная в результате компьютерного моделирования процесса раскатки гильзы $D_G=122$ мм, $S_G=28$ мм в трубу $D_T=83$ мм, $S_T=12$ мм при температуре исходной гильзы 1100°C составляет 653 кН. Разница между усилиями компьютерной модели и данными, полученными М.А. Минтахановым, не превышает 10 %.

Значение удельных усилий в зоне редуцирования для всех исследуемых труб с различным значением D/S меняется незначительно (отклонение составляет 6-10 %). Можно отметить, что удельная сила металла на валок как в зоне редуцирования, так и в зоне обжатия не имеет прямой зависимости от D/S трубы. Среднее удельное усилие в зоне редуцирования составляет 98 МПа, а в зоне обжатия – 128 МПа, а их отношение – 0,76.

На рисунке 2 показана эпюра удельной силы по длине очага деформации, полученная при анализе моделирования процесса раскатки трубы с

$D/S = 12$ согласно данным таблицы 2. На входном участке в зоне редуцирования гильзы (где осуществляется обжатие по диаметру, но не по толщине стенки), среднее значение удельной силы металла на валок (сечение I-I) составляет 96 МПа. При обжатии стенки значение удельных сил увеличивается, среднее значение составляет 116 МПа (сечение II-II). Для раскатки толстостенной и тонкостенной труб изменение удельной силы в области обжатия перед гребнем не превышает 10 %. Наибольшие значения удельной силы металла на валок наблюдаются на гребне вала. В сечении III-III (середина гребня вала) значение удельной силы составляет 139 МПа.

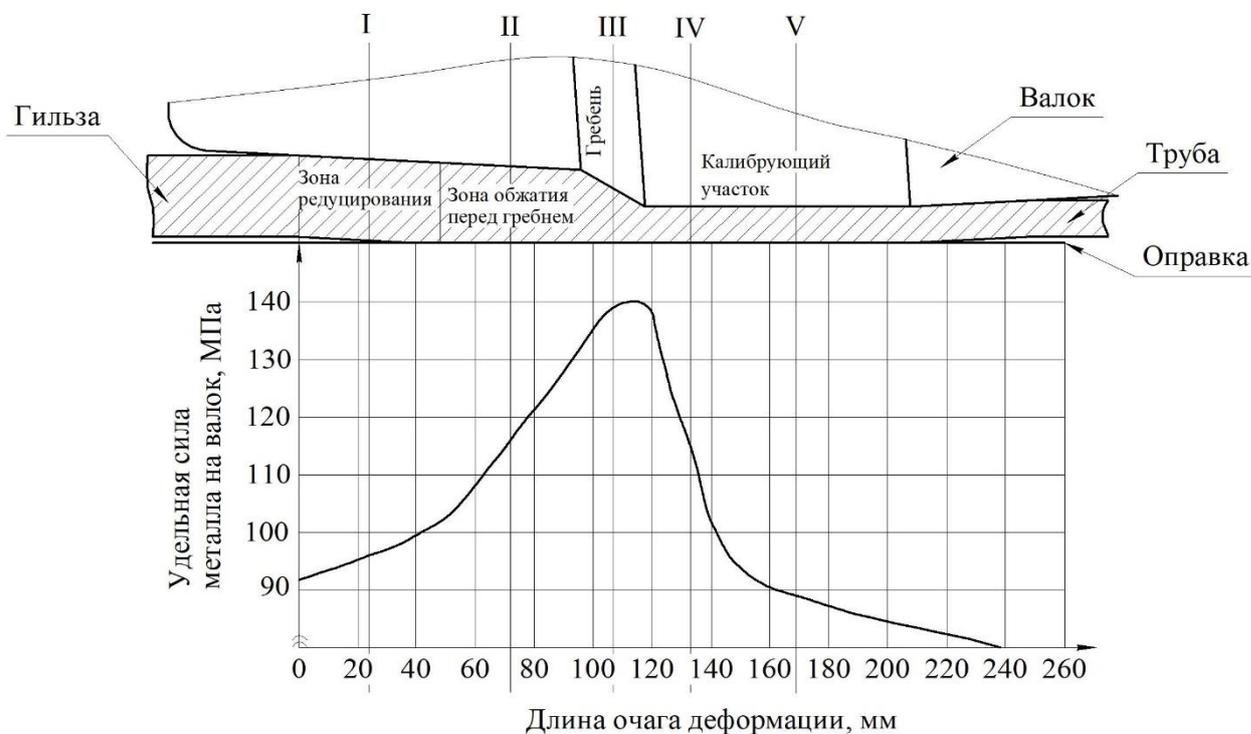


Рисунок 2 – Распределение удельной силы металла на валок в зоне обжатия стенки p_c при раскатке трубы с $D/S = 12$

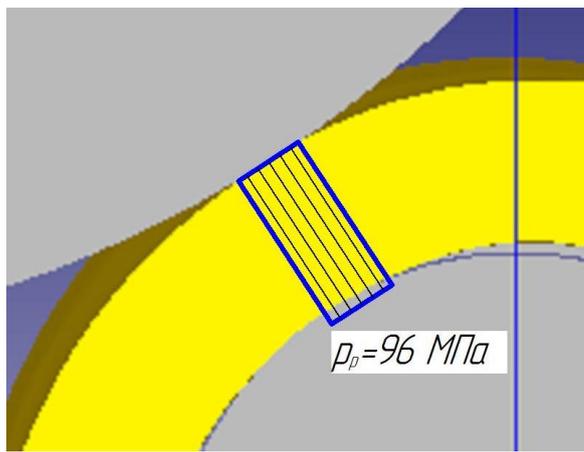
На калибрующем участке, в зоне обжатия стенки длина которой соответствует трети шага подачи от вершины гребня, среднее значение удельной силы составляет 115 МПа (сечение IV-IV). Сечение V-V располагается в середине калибрующего участка, где осуществляется обжатие трубы по диаметру,

значение удельной силы соответствует зоне редуцирования и составляет 89 МПа.

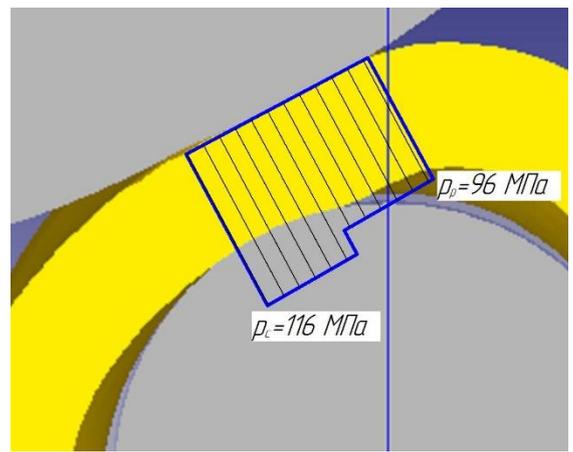
На рисунке 3 представлены эпюры распределения средней удельной силы по ширине контакта гильзы с валком в процессе раскатки трубы с $D/S = 12$. По ширине контактной поверхности, как и по ее длине удельная сила в зоне редуцирования меньше удельной силы в зоне обжатия гильзы по стенке. В процессе раскатки, отношение, p_p к p_c изменяется следующим образом: $p_p/p_c = 0,83$ в сечении II-II, $p_p/p_c = 0,69$ в сечении III-III, $p_p/p_c = 0,78$ в сечении IV-IV. Так как в зоне редуцирования, которой соответствуют сечения I-I и V-V нет обжатия стенки трубы, то по всей ширине контактной поверхности действует только удельная сила p_p . Отношение p_p/p_c на входном участке и гребне валка уменьшается, а на калибрующем участке в зоне обжатия стенки - увеличивается. Среднее значение отношения p_p/p_c также составляет 0,76.

В таблице 3 представлены расчетные значения усилия в зоне редуцирования – p_p , полученные по формуле (5) для раскатки труб с $D/S=7, 8, 10, 12$, а усилия в зоне редуцирования – p_p , полученные с помощью компьютерного моделирования, представлены в таблице 2.

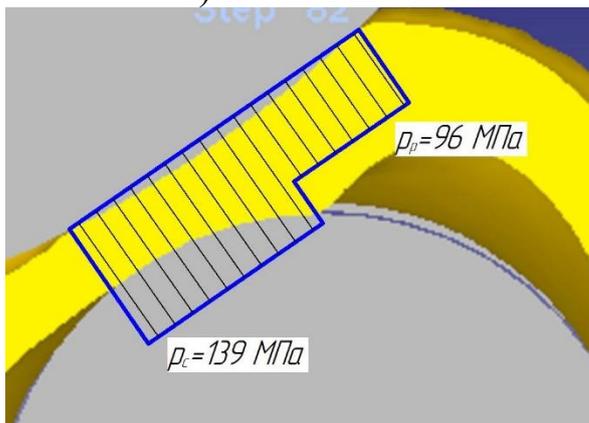
Согласно методике линий скольжения (характеристик), если полый цилиндр нагружен усилием p_o по внутреннему контуру на некоторой ширине b_o , которая характеризует ширину контактной поверхности металла с оправкой, то по толщине стенки возникают дополнительные сжимающие и растягивающие напряжения от действия усилия p_o (см. рисунок 4). Такое напряженное состояние характерно для зоны обжатия стенки гильзы. В точках A и B поля линий скольжения от удельной силы p_p и p_o накладываются друг на друга. На контактной поверхности металла с валком в точке A действует усилие p_c равное сумме усилий p_p и p_o . В результате, усилие в зоне обжатия по стенке можно определить по формуле (6).



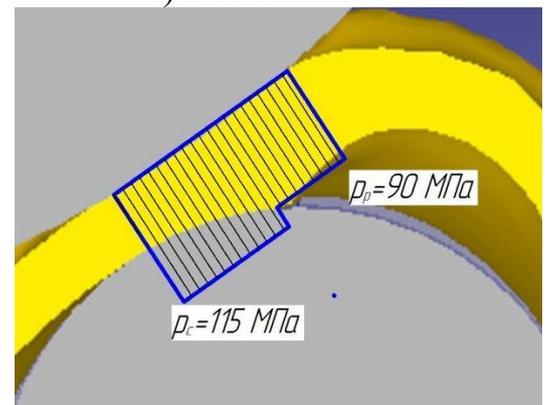
а) в сечении I-I



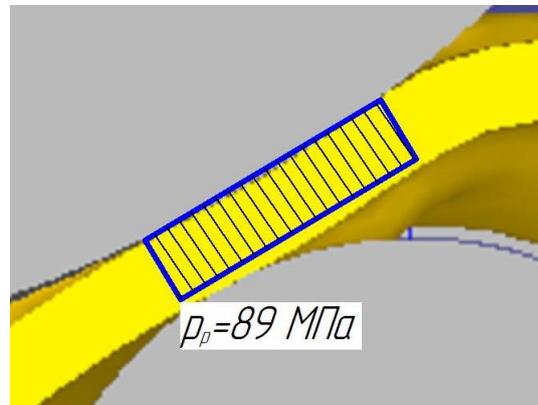
б) в сечении II-II



в) в сечении III-III



г) в сечении IV-IV



д) в сечении V-V

Рисунок 3 – Удельные силы металла на валок по ширине контактной поверхности

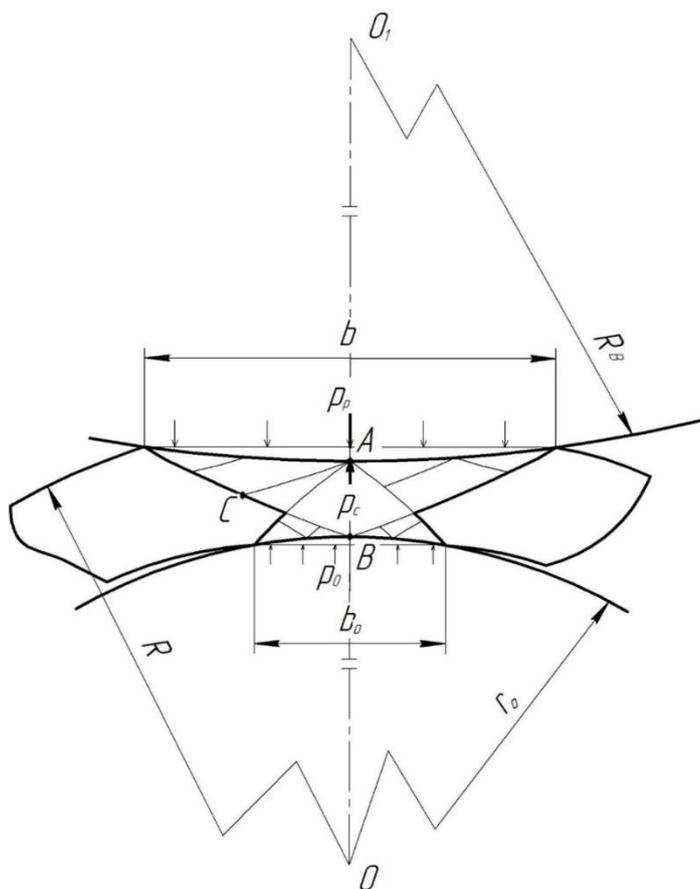


Рисунок 4 – Поле линий скольжения в зоне обжатия стенки гильзы

Расчетное удельное усилие в зоне обжатия – $p_{c p}$ можно определить аналогично $p_{p p}$ с учетом диаметра оправки d_o (рисунок 4) по формуле:

$$p_c = \mu \cdot \sigma_{\Phi} \cdot n''_{\sigma} \left(\left[\ln \left(2S \frac{1}{D_B} + 1 \right) + \ln \left(2S \frac{1}{d_o} + 1 \right) - 1 \right] + \frac{1}{S} \left[D_B \ln \left(\frac{2S}{D_B} + 1 \right) + d_o \ln \left(\frac{2S}{d_o} + 1 \right) \right] \right) \quad (6)$$

где D_B – диаметр валка по вершине гребня, мм;

d_o – диаметр оправки, мм;

S – средняя толщина стенки гильзы-трубы, мм;

μ – коэффициент схемы напряженного состояния равный 1,15;

n''_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние внешних зон.

По результатам сравнения разница между расчетными значениями $p_{c p}$ и значениями p_c , полученными компьютерным моделированием (см. табл. 2 и 3) не превышает 10 %.

Таблица 3 – Значение средних удельных усилий, полученные расчетным способом

Отношение диаметра к толщине стенки D/S	Среднее удельное усилие в зоне редуцирования $p_{p p}$ МПа и в зоне обжатия $p_{c p}$ МПа		Отношение среднего удельного усилия в зоне редуцирования к усилию зоны обжатия
	$p_{p p}$	$p_{c p}$	
7	99	146	0,67
8	99	135	0,73
10	98	133	0,74
12	98	132	0,74

Расчёт $p_{p p}$ и $p_{c p}$ по формулам (5, 6), а также результаты компьютерного моделирования показывают, что отношение p_p/p_c составляет 0,67–0,80. В инженерных расчетах усилие в зоне обжатия стенки можно определить по соотношению:

$$p_c = \frac{p_p}{0,75} = 1,3p_p \quad (7)$$

Среднее удельное усилие в зоне редуцирования на 35 % меньше среднего удельного усилия в зоне обжатия. Можно привести пример процесса прошивки, где также выделяются два участка очага деформации: участок прошивки и раскатки гильзы. Исследования, представленные в источнике [45], показывают, что средняя удельная сила участка прошивки на 20 – 40 % больше участка раскатки. Это соотношение характерно и для раскатного стана. Участок прошивки эквивалентен участку обжатия, а участок раскатки – участку редуцирования. В связи с этим, необходимо рассмотреть две зоны контактной поверхности металла с валком: зону редуцирования и зону обжатия стенки.

При калибровании следует учитывать только зону редуцирования, поскольку процесс прокатки осуществляется без оправки.

На рисунке 5 представлена схема пятна контактной поверхности заторможенного образца при раскатке трубы в трехвалковом раскатном стане. Пятно контактной поверхности имеет характерное уширение в районе гребня валка. При расчете площади пятна контактной поверхности его можно представить в виде простейших геометрических фигур, как при расчете площади контактной поверхности при прошивке (см. рис. 5) [2, 41, 45].

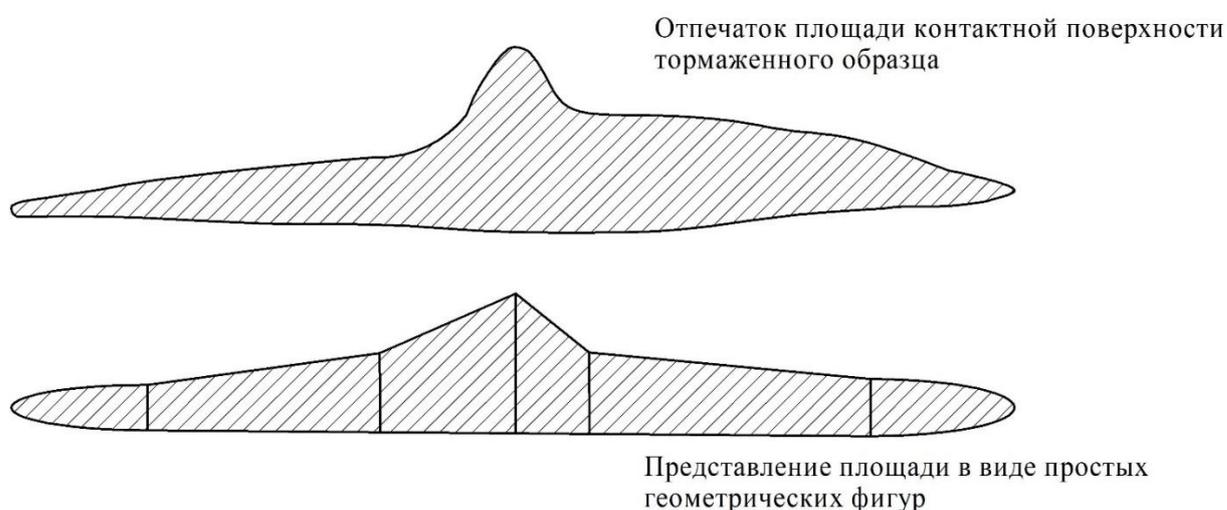


Рисунок 5 – Форма площади контактной поверхности гильзы с валком при раскатке

Для определения площади контактной поверхности требуется рассчитать ширину в каждом из рассмотренных поперечных сечений очага деформации. Основываясь на способе определения ширины контактной поверхности, представленном в работах [30-33], ширину зоны редуцирования и обжатия можно определить следующим образом:

$$b_p = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot r}{(R+r) \cdot (\Delta S_p + \Delta S_c)}} \cdot \Delta S_p \quad (8)$$

$$b_c = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot r}{(R+r) \cdot (\Delta S_p + \Delta S_c)}} \cdot \Delta S_c \quad (9)$$

где b_p – ширина контактной поверхности в зоне редуцирования, мм;
 b_c – ширина контактной поверхности в зоне обжатия стенки гильзы, мм;
 R – радиус валка, мм;
 r – радиус калибра очага деформации в поперечном сечении, мм;
 ΔS_p – частное обжатие гильзы по радиусу на участке редуцирования (частное редуцирования), мм;
 ΔS_c – частное обжатие стенки гильзы в зоне обжатия по стенке на оправке, мм.

Эпюра ширины контактной поверхности при раскатке трубы с $D/S = 12$ (диаметром 150 мм, толщиной стенки 12,5 мм) представлена на рисунке 6. На эпюре отмечены значения ширин контактной поверхности. Зона обжатия по толщине стенки отмечена на эпюре штриховкой. До сечения 0–0, и после сечения IV–IV контактная поверхность включает в себя только зону редуцирования, и находится как площадь овала (см. рисунок 5). В сечении 0–0 производится посадка внутренней поверхности гильзы на оправку, и начинается обжатие по стенке. Контактная поверхность имеет зону редуцирования с площадью F_p и зону обжатия с площадью F_c .

Площадь F_c на участке от сечения 0–0 до I–I определяется как площадь четверти овала, а площадь редуцирования F_p можно определить как площадь трапеции, заключенной между рассматриваемыми поперечными сечениями очага деформации.

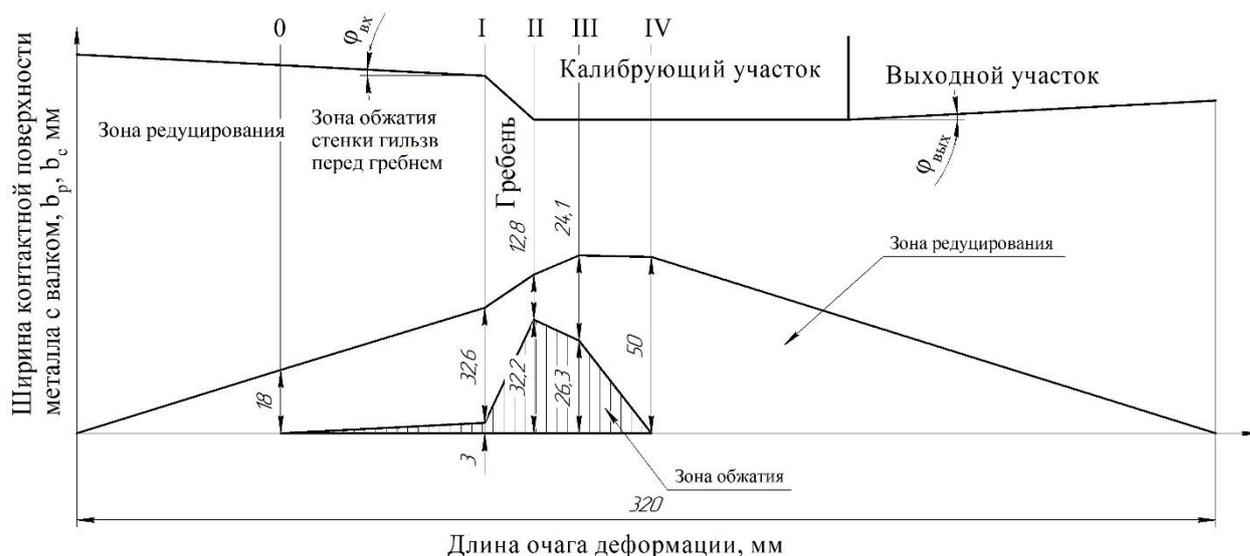


Рисунок 6 – Эпюра ширин контактной поверхности при раскатке трубы с $D/S = 12$

На эпюре наглядно видно, что площадь контактной поверхности в зоне редуцирования гораздо больше, чем площадь в зоне обжатия. Суммарная площадь контактной поверхности зоны редуцирования, согласно эпюре рисунка 6 составляет 6256 мм^2 , а площадь зоны обжатия – 960 мм^2 , что в шесть раз выше, следовательно, при определении энергосиловых параметров следует учитывать обе зоны деформирования.

Для определения ширины и площади контактной поверхности по рассмотренным зонам, требуется определить деформационные параметры. В процессе винтовой прокатки, металл деформируется последовательно каждым валком. Величина осевого перемещения гильзы от одного вала к другому для трехвалкового стана равна трети шага подачи [32, 41-42].

В процессе прокатки на трехвалковом стане очаг деформации в поперечном сечении не имеет замкнутого контура. Между соседними валками остается свободное пространство – межвалковые зазоры, куда в процессе прокатки осуществляется смещение металла. За счет этого образуется зазор между оправкой и внутренней поверхностью гильзы.

На рисунке 7 представлена схема очага деформации в поперечном сечении. В точке *A* начинается контакт металла с рабочим валком. На участке *AC*

осуществляется обжатие гильзы по диаметру и выбор зазора между оправкой и внутренней поверхности гильзы. Этому участку соответствует зона редуцирования с шириной контактной поверхности – b_p . Для оценки зоны редуцирования введено понятие величины частного обжатия гильзы по радиусу или частного редуцирования за один цикл деформации – ΔS_p , которое является частью суммарного частного обжатия и равно разнице между радиусами гильзы r_A и r_C .

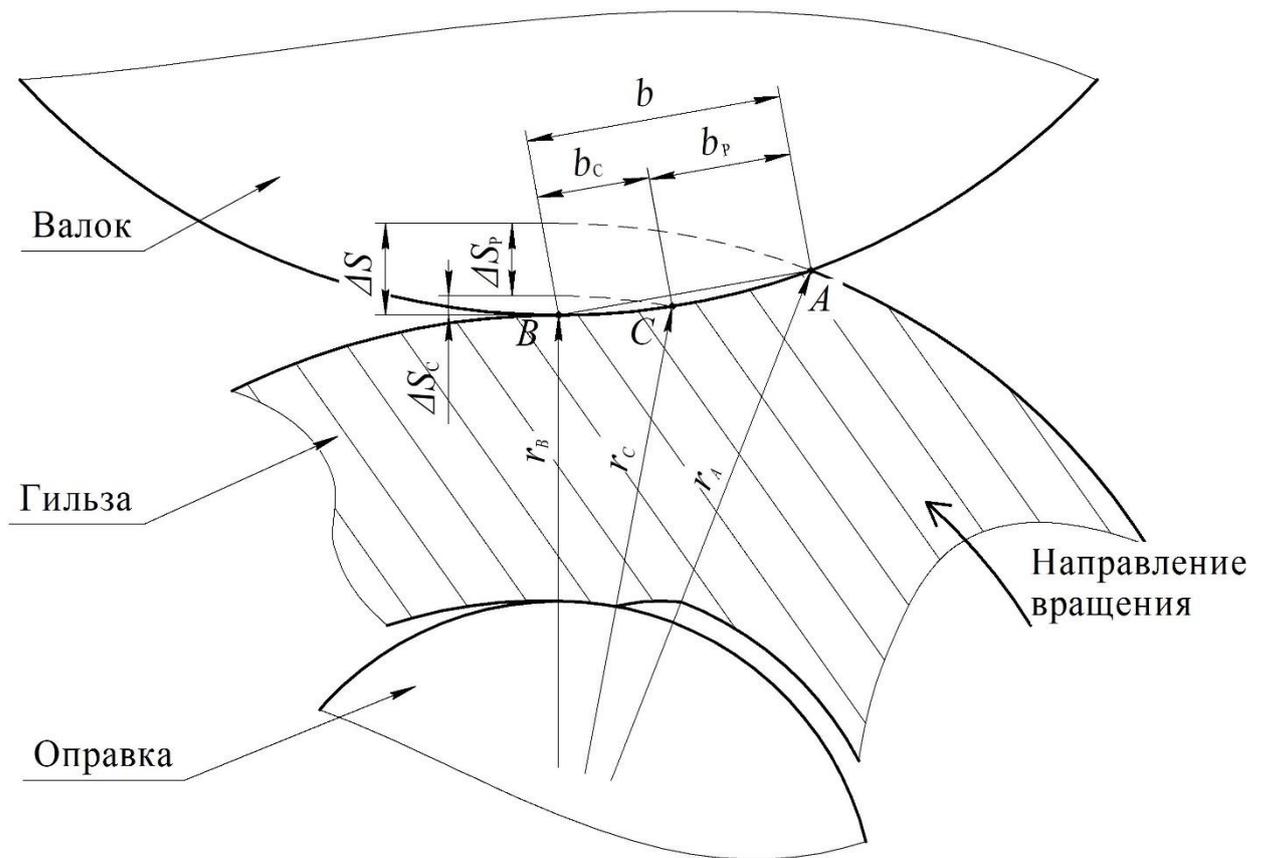


Рисунок 7 – Схема очага деформации трехвалкового раскатного стана в поперечном сечении

От точки C до B располагается зона обжатия с шириной контактной поверхности – b_c , на которой осуществляется деформация гильзы по толщине стенки на величину частного обжатия – ΔS_c , которое равно разнице между радиусами гильзы r_C и r_B . Суммарное частное обжатие ΔS является суммой ΔS_p и

ΔS_c . Суммарную ширину контактной поверхности b в поперечном сечении можно представить как сумму ширин b_p и b_c .

При наличии тангенциальной составляющей скорости осуществляется смещение металла в межвалковое пространство, увеличивается ширина контактной поверхности металла с валком. Величина смещения металла в межвалковое пространство зависит от обжатия трубы по диаметру, отношения диаметра к толщине стенки трубы. Поскольку процесс калибрования осуществляется без оправки, то для определения ширины и площади контактной поверхности металла с валком, необходимо знать величину частного редуцирования ΔS_p равное разнице радиусов r_A и r_B .

Величину частного редуцирования за цикл деформации в процессе раскатки можно определить как разницу между суммарным частным обжатием и частным обжатием по толщине стенки. Расчет частного обжатия по толщине стенки для процесса раскатки в валках с гребнем подробно рассмотрен в работе [49].

Для того, чтобы определить суммарное частное обжатие равное разнице радиусов r_A и r_B в процессе раскатки, и частное редуцирование в процессе калибрования, введен коэффициент овальности – ξ , равный отношению радиусов гильзы r_A к r_B , который определяется по формуле:

$$\xi = \frac{r_A}{r_B} \quad (10)$$

Радиус r_B – соответствует радиусу калибра очага деформации. Коэффициент ξ зависит от геометрических параметров очага деформации и смещения металла в межвалковое пространство. Коэффициент овальности характеризует овальность гильзы при ее деформировании на трехвалковом стане.

Исследование изменения овальности осуществлялось с использованием компьютерного моделирования. График распределения коэффициента овальности по длине очага деформации при раскатке трубы с $D/S = 12$ представлен

на рисунке 8. От начала очага деформации до сечения 0–0 выполняется редуцирование гильзы, а после сечения 0–0 осуществляется как редуцирование, так и обжатие стенки гильзы. Максимального значения коэффициент овальности достигает в сечении IV-IV на калибрующем участке очага деформации. В этом же сечении прекращается обжатие по толщине стенки. Там же наблюдается наибольшая разница между радиусами r_A и r_B . Между сечениями IV-IV и V-V коэффициент овальности незначительно уменьшается.

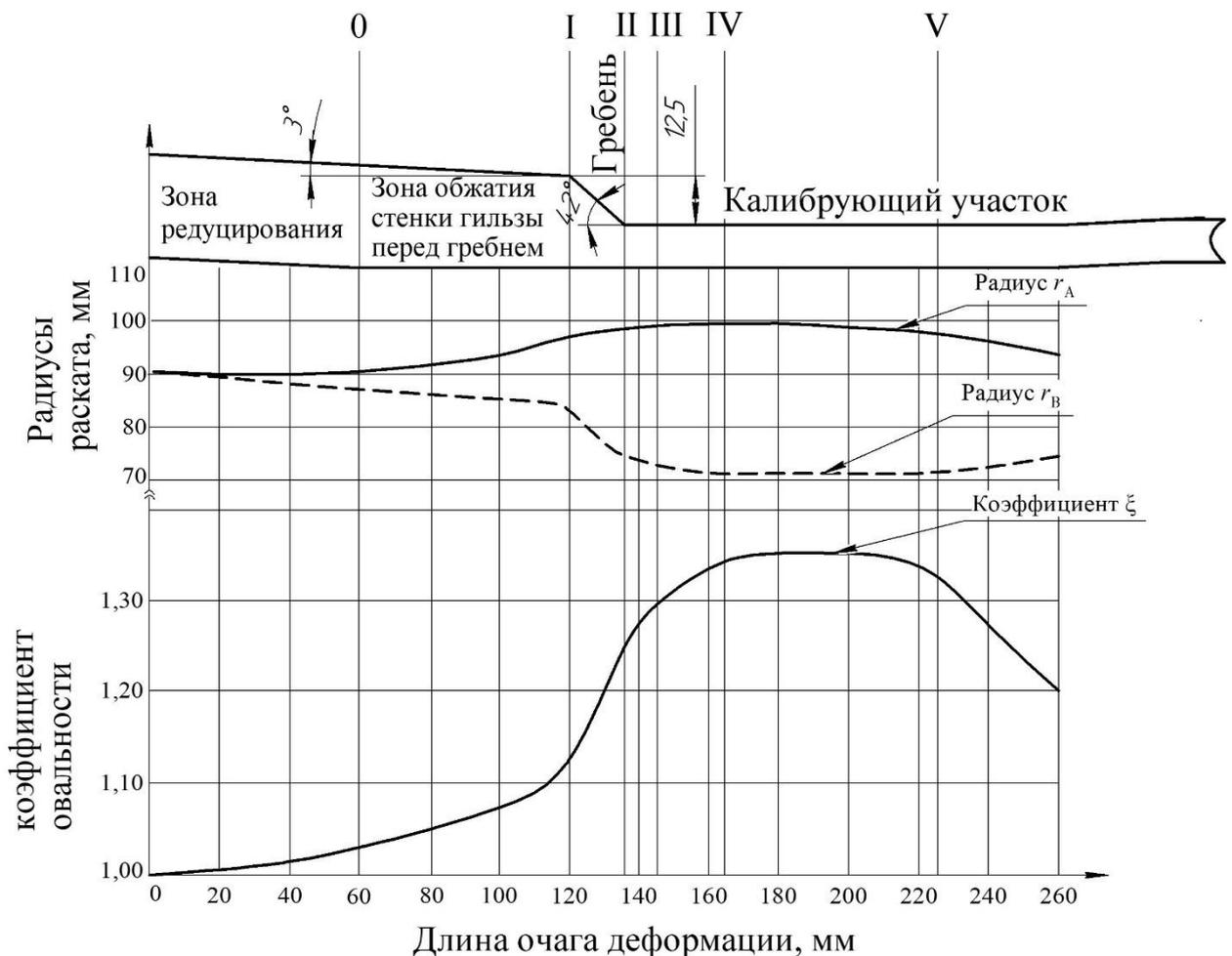


Рисунок 8 – Распределение радиусов раската и коэффициента овальности по длине очага деформации при раскатке трубы с $D/S=12$

Зная значения коэффициента овальности в поперечных сечениях очага деформации, суммарное частное обжатие можно определить согласно формуле:

$$\Delta S = r_B \cdot (\xi - 1) \quad (11)$$

С другой стороны, частное обжатие по стенке можно выразить следующим образом:

$$\Delta S_c = r_c - r_B = r_B \cdot (\chi - 1) \quad (12)$$

где χ – отношение радиуса r_c к r_B .

Тогда частное редуцирование определяется следующим образом:

$$\Delta S_p = r_B \cdot (\xi - \chi) \quad (13)$$

Коэффициент χ равен отношению радиусов r_c к r_B , которые полностью зависят от геометрических параметров очага деформации и настройки стана, находится по формуле:

$$\chi = \frac{\Delta S_c}{r_B} + 1 \quad (14)$$

Коэффициент χ является коэффициентом изменения калибра очага деформации на рассматриваемом шаге подачи и не учитывает смещения металла в межвалковое пространство.

В сечениях, где осуществляется только редуцирование, или при расчете деформационных параметров процесса калибрования, ΔS_c равно 0. Тогда, частное редуцирование соответствует суммарному частному обжатию и может быть определено по формуле (11). Однако, величина дополнительного частного редуцирования, которая появляется за счет смещения металла в межвалковое пространство определяется так же, как и ΔS_p по формуле (13).

Для процесса калибрования параметр χ определяется по изменению геометрических параметров очага деформации, а именно радиусов калибра, на рассматриваемом шаге подачи. Для процесса раскатки разница $(\xi - \chi)$ определяет зону редуцирования, которая не включает в себя обжатие по стенке на оправке и зависит от условий деформации в межвалковом пространстве, для процесса безоправочной прокатки определяет зону обжатия, которая возникает за счет смещения металла в межвалковое пространство на рассматриваемом шаге подачи. Представленная методика расчета деформационных и энергосиловых параметров легла в основу разработанной компьютерной программы [50].

2.2 Изменение толщины стенки гильзы в зоне редуцирования

В зоне редуцирования при небольших суммарных частных обжатиях, толщина стенки изменяется на незначительную величину и не учитывается. Однако с увеличением обжатия по диаметру, смещения металла в межвалковое пространство становится больше, как следствие величина частного редуцирования увеличивается. Это особенно характерно для процесса раскатки гильзы с большим обжатием по диаметру. Этот процесс сопровождается расширением зоны редуцирования и увеличением обжатия по толщине стенки.

Поскольку удельное усилие в зоне обжатия выше, следовательно, увеличение площади контактной поверхности зоны обжатия по стенке приведет к увеличению силы, действующей со стороны металла на валок. Для того, чтобы компенсировать увеличение толщины стенки при редуцировании, необходимо уменьшить толщину стенки в прошивном стане за счет увеличения диаметра оправки. В этом случае, для определения конечных размеров трубы, следует определять изменение толщины стенки при безоправочной прокатке.

Известно, что при непрерывной безоправочной прокатке труб, особенно в процессе редуцирования без натяжения, толщина стенки увеличивается [51]. В процессе калибрования с повышенным обжатием по диаметру наблюдается

увеличение толщины стенки трубы, в источниках [21-22] приведены экспериментальные исследования. Как отмечено в работах [23-26, 52] при редуцировании, толщина стенки может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от суммарного обжатия по диаметру и отношения D/S гильзы. В работах [53-54] представлено исследование влияния коэффициента кинематического натяжения на изменение толщины стенки трубы. Однако при винтовой безоправочной прокатке, реализация натяжения невозможно.

На рисунке 9 в общем виде рассмотрена схема изменения геометрических размеров трубы в очаге деформации при безоправочной прокатки в валках с углом наклона образующей обжимного участка к оси прокатки φ . Диаметр исходной трубы – D_0 , толщина стенки – S_0 . Пусть при обжатии по диаметру на ΔD , получена труба диаметром D_T с толщиной стенки S_T . При этом, в процессе прокатки на обжимном участке длиной l толщина стенки трубы увеличилась на ΔS . Тогда, согласно схеме, общее увеличение толщины стенки можно определить по формуле (15):

$$\Delta S = l \cdot tg(\varphi + \tau) - 0,5 \cdot \Delta D \quad (15)$$

где φ – угол наклона входного участка к оси прокатки

τ – угол, характеризующий изменение толщины стенки трубы (рисунок 9).

Как следует из схемы рисунка 9, с учетом значения угла τ , который характеризует интенсивность изменения толщины стенки в продольном сечении очага деформации, можно определить изменение толщины стенки при любом обжатии на заданной калибровке валков. Изменение толщины стенки можно представить в общем виде через относительное обжатие трубы по диаметру согласно уравнению:

$$\Delta S = 0,5 \cdot \varepsilon_d \cdot D_r \frac{\operatorname{tg}(\tau) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\varphi))}{\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (1 - \operatorname{tg}(\tau) \cdot \operatorname{tg}(\varphi))} \quad (16)$$

где $\varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D_r}$ – относительное обжатие по диаметру.

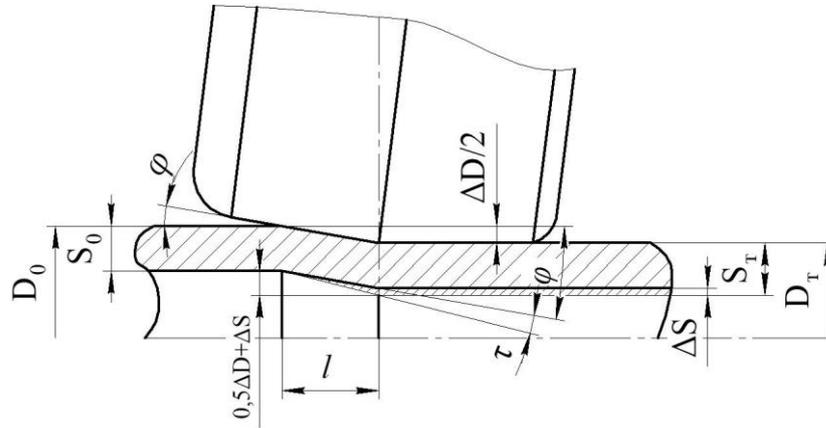


Рисунок 9 – Схема изменения геометрических размеров трубы в очаге деформации

Для прогнозирования изменения толщины стенки трубы при безоправочной прокатке гильзы с заданным обжатием по диаметру, достаточно знать значение угла τ , которое можно определить по формуле, если известна величина изменения толщины стенки:

$$\operatorname{tg}(\tau) = \frac{\Delta S \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}{0,5 \cdot \varepsilon_d \cdot D_r + \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot (0,5 \cdot \varepsilon_d \cdot D_r + \Delta S)} \quad (17)$$

При τ больше 0, толщина стенки увеличивается, а при τ меньше – уменьшается.

В случае, когда очаг деформации образован валками с двумя и более обжимными участками, второй и последующие участки работают полностью и осуществляют обжатие на постоянную величину, интенсивность изменения толщины стенки на участке будет максимально возможная. В связи с этим можно заменить обжимные участки одним эквивалентным участком с углом наклона $\varphi_{\text{п}}$, то согласно формуле 16, интенсивность изменения толщины

стенки на эквивалентном участке будет характеризоваться углом τ_{Π} . Углы φ_{Π} и τ_{Π} являются приведенными. В этом случае τ_{Π} характеризует интенсивность изменения толщины стенки по очагу деформации в целом. Приведенный угол φ_{Π} для очага деформации с N обжимными участками определяется по формуле (18), а для очага деформации с двумя обжимными участками можно определить по формуле:

$$tg(\varphi_{\Pi}) = \frac{\sum_{i=1}^N l_i \cdot tg(\varphi_i)}{\sum_{i=1}^N l_i} \quad (18)$$

где l_i – длина обжимного участка;

φ_i - угол наклона образующей валка обжимного участка к оси прокатки;

$$tg(\varphi_{\Pi}) = \frac{D_p \cdot \varepsilon_d \cdot tg(\varphi_1)}{D_p \cdot \varepsilon_d + 2 \cdot l_2 \cdot (tg(\varphi_1) - tg(\varphi_2))} \quad (19)$$

Где φ_1 и φ_2 – углы наклона образующей валка к оси прокатки на первом и втором обжимных участках соответственно.

Поскольку первый обжимной участок работает не полностью, то его длина зависит от величины обжатия гильзы по диаметру данным участком. Значение приведенного угла φ_{Π} , в зависимости от величины обжатия по диаметру, будет меняться. Приведенный угол τ_{Π} определяется по формуле (17) с учетом угла φ_{Π} .

2.3 Особенности проектирования подшипниковых опор

Использование новых режимов процесса раскатки и калибрования требует модернизации конструкции рабочей клетки, а именно, возможность сведения рабочих валков на меньший калибр. Так как основное усилие при раскатке воспринимается валом с рабочим валком и через подшипниковые опоры передается на станину, то с увеличением нагрузки при раскатке с повышенным обжатием по диаметру существует вероятность быстрого износа подшипников.

С целью возможности применения подшипников большей грузоподъемности за счет изменения пространственного расположения валкового узла в станине, проведен анализ геометрии валкового узла трехвалковых станов винтовой прокатки.

Все трехвалковые станы имеют схожую конструкцию к особенностям которой относится сложное пространственное расположение рабочих валков. При развороте валков на большие значения углов подачи и раскатки существует ограничение сведения валков на минимальный калибр очага деформации, ограничивается пространство для размещения подшипниковых опор. Это приводит к уменьшению ее габаритов и снижению долговечности и прочности валкового узла.

В работах [55-56] подробно разобрана методика анализа геометрических параметров винтовой прокатки для станов с консольными валками. В источниках [32, 45] изложены методики расчета искажения очага деформации станом винтовой прокатки при развороте валков на угол подачи и раскатки. В источниках [58-60] рассмотрены особенности геометрии и калибровки рабочих валков, представлена усовершенствованная методика расчета геометрии очага деформации трехвалковых станом с повышенными значениями углов подачи и раскатки. Используя рассмотренные источники осуществлен расчет геометрии валковых узлов станом винтовой прокатки и определение максимального диаметра рабочих валков.

На рисунке 10 представлено расположение валков трехвалкового стана. Рабочие валки стана с максимальным диаметром – D_B^{max} сведены на минимальный калибр – d_k^{min} . Рабочие валки развернуты на угол подачи – β и раскатки – γ . Необходимо определять максимально возможный диаметр рабочих валков D_B^{max} при заданных параметрах, а именно, минимального калибра очага деформации, минимального зазора между соседними валками, и максимальном развороте валка на углы β и γ [45]. Эту связь можно представить в виде неравенства (20), с учетом того, что диаметры валков равны, угол $\varphi=30^\circ$:

$$D_B^{max} \leq \frac{d_k^{min} - \frac{\Delta}{\cos(\varphi)}}{k} \quad (20)$$

где Δ – зазор между соседними валками;

k – коэффициент, связывающий диаметр валка с диаметром калибра (21).

Формула (20) показывает взаимосвязь между диаметром рабочего валка, минимальным диаметром калибра и зазора между соседними валками. Коэффициент связи k включает в себя такие параметры как угол подачи, раскатки и количество рабочих валков.

При определении диаметра валка для трехвалкового стана, коэффициент k зависит от разворота валков на угол подачи и раскатки. Проекция окружности валка на плоскость сечения А-А имеет вид эллипса. Коэффициент k с учетом β и γ для трехвалкового стана при $\varphi = 30^\circ$ определяется по формуле (21):

$$k = \frac{\cos(\gamma) - 0,87 \cdot \sqrt{0,75 \cdot \cos(\gamma)^2 + 0,25 \cdot \cos(\beta)^2}}{\cos(\gamma) \cdot \sqrt{0,57 \cdot \cos(\gamma)^2 + 0,19 \cdot \cos(\beta)^2}} \quad (21)$$

Значения D_B^{max} для трехвалкового стана с учетом β меняются согласно кривой представленной на рисунке 11. Кривая показывает изменение диаметров валков трехвалкового стана с минимальным значением диаметра калибра очага деформации 70 мм.

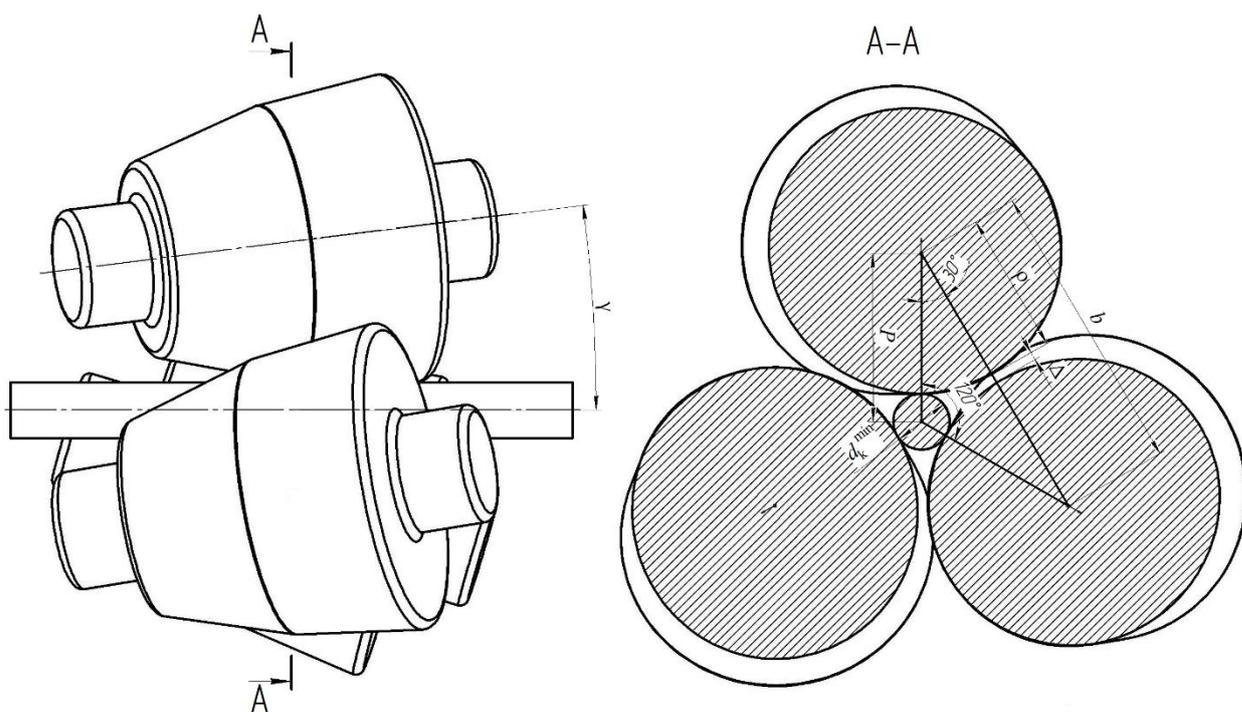


Рисунок 10 – Расположение валков

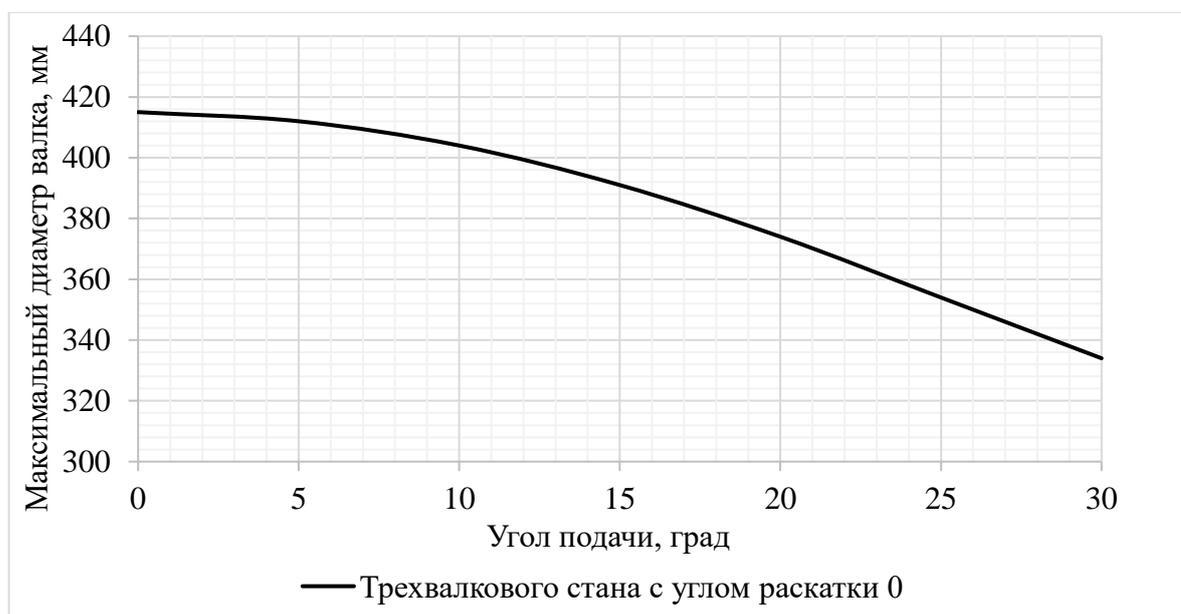


Рисунок 11 - Диаметр рабочих валков трехвалкового стана

При изменении β от 0° до 10° диаметр валка уменьшается на 11 мм. Изменение β в данном диапазоне не оказывает существенного влияния на диаметр валков. При дальнейшем увеличении угла подачи до 30° , его влияние на

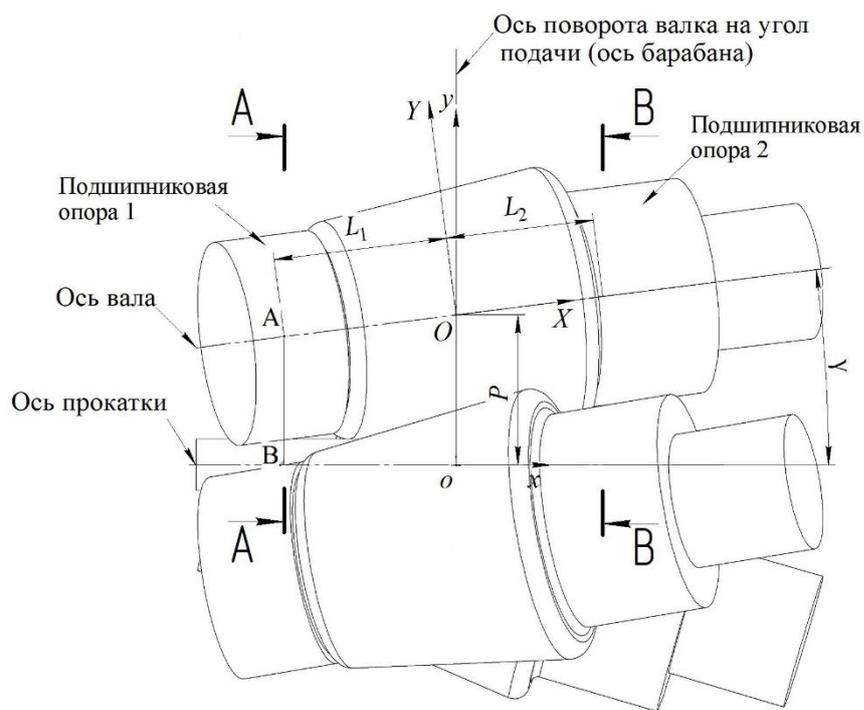
максимальный диаметр валка увеличивается. Так, при изменении β от 5° до 25° , диаметр валка уменьшается на 40 мм. В станах с большими углами подачи, расчет максимально возможного диаметра валка следует осуществлять с учетом угла подачи.

Ввиду сложности пространственного расположения валков, проектирование валкового узла станов винтовой прокатки осуществляется без учета разворота валков на угол подачи. Проектирование подшипниковых опор с учетом разворота валков на угол подачи и раскатки позволяет решить задачу, связанную с увеличением свободного пространства наиболее нагруженной подшипниковой опоры для размещения подшипников большей грузоподъемностью. В работе [61] рассмотрена методика проектирования подшипниковых опор валковых узлов трехвалковых станов.

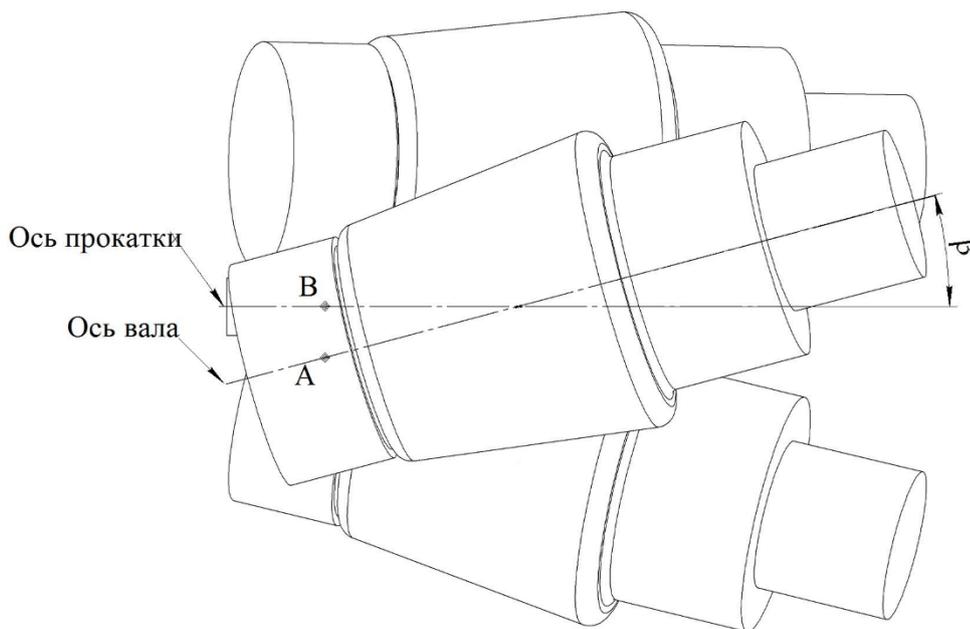
На рисунке 12 представлена пространственная схема валкового узла трехвалкового стана. В результате разворота валка на угол подачи, подшипниковые опоры удаляются от оси прокатки. Образовавшееся свободное пространство можно использовать для размещения подшипника большего диаметра.

В результате разворота валков на угол раскатки первая подшипниковая опора приближена к оси прокатки, а вторая удалена. Первая опора имеет меньшее пространство для размещения подшипника. При выборе последнего необходимо определить внутренний диаметр – $D_{\text{вн}}$ в опоре, предназначенный для его размещения.

Выбрана система координат $oxuz$, связанная с очагом деформации так, чтобы ось ox и ось прокатки были направлены в одну сторону, а ось ou совпала с осью поворота валка на угол подачи или с осью барабана.



а



б

Рисунок 12 – Расположение валков стана винтовой прокатки:

а–вид спереди, б–вид сверху

1 — ось прокатки; 2 — ось вала; 3 — первая подшипниковая опора; 4 — ось поворота валка на угол подачи (ось барабана); 5 — вторая подшипниковая опора

Согласно методике расчета геометрии очага деформации, представленной в работах [45,54], выбрана система координат $OXYZ$, связанная с валком таким образом, чтобы ось OX совпадала с осью валка, а точка O лежала на оси ou на расстоянии P от точки O .

Значение параметра P с учетом угла раскатки определяется по формуле:

$$P = 0,5 \cdot \left(\frac{D_6}{\cos \gamma} + D_K^{\min} \right) \quad (22)$$

где D_6 – диаметр бочки валка.

Сечение $A-A$ (см рисунок 12) первой подшипниковой опоры удалено от оси барабана на расстояние L_1 вдоль оси OX , а сечение $B-B$ второй подшипниковой опоры — в противоположном направлении на расстояние L_2 .

Пусть в плоскости сечения $A-A$ имеются две точки A , и B . Первая лежит на оси валка, вторая — на оси прокатки, тогда отрезок AB является кратчайшим расстоянием между осью прокатки и валка в плоскости сечения $A-A$ — H_{A-A} .

На рисунке 13 приведена схема к определению диаметра подшипника, где обозначены следующие параметры: $R_{вн1}$ и $R_{вн2}$ — внутренние радиусы первой и второй подшипниковой опоры; H_{A-A} и H_{B-B} — расстояния между осями валка и прокатки в сечениях $A-A$ и $B-B$; Δ — зазор между заготовкой и подушкой, обеспечивающий свободное прохождение металла; S — толщина стенки подушки в области прохождения металла. Поскольку валок развернут на углы подачи и раскатки, для определения внутреннего диаметра опоры необходимо найти проекцию ρ внутреннего радиуса опоры $R_{вн1}$ или $R_{вн2}$. В общем случае ρ можно представить в виде соотношения:

$$\rho = \frac{R_{\text{вн}}}{\sqrt{\sin^2 \varphi \cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi \cos^2 \beta}}, \quad (23)$$

где $R_{\text{вн}}$ — внутренний радиус опоры; φ — угол меридионального сечения, равный φ_1 для сечения $A-A$ и φ_2 для сечения $B-B$.

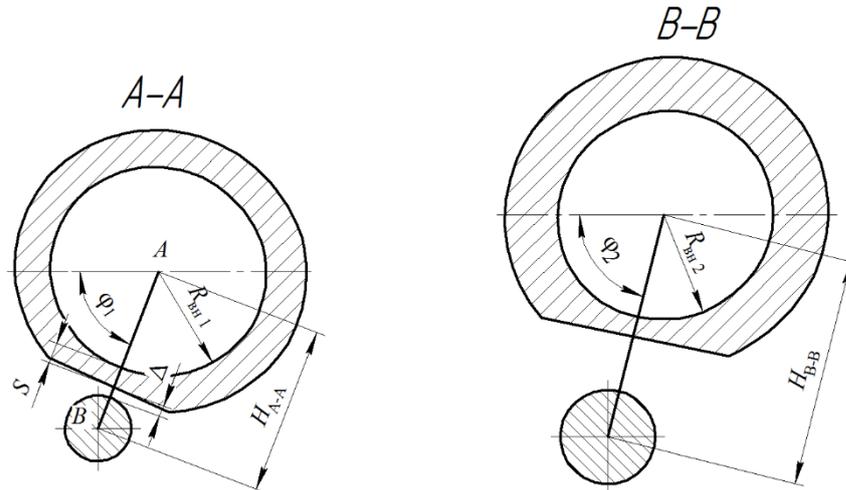


Рисунок 13 – Схема к определению диаметра подшипника

Расстояние H_{A-A} определяется по формуле:

$$H_{A-A} = \rho + 0,5 \cdot D_{\text{к}}^{\text{min}} + \Delta + S \cdot \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\gamma) + \cos^2(\varphi) \cdot \cos^2(\beta)}} \quad (24)$$

Выразив $R_{\text{п}}$ через ρ используя выражение (23), подставив значения в уравнение (24) и решив его относительно $R_{\text{п}}$, получается уравнение (25) по которому можно определения диаметра подшипника $D_{\text{п}}$ (25).

При определении внутреннего диаметра первой опоры по формуле (25), проводимого для минимального угла подачи по технической характеристике стана, требуется выбрать такое сечение $A-A$, в котором расстояние H_{A-A} является минимальным, т. е. сечение $A-A$ должно быть удалено от оси барабана на

расстояние $L_1 = L_{H_{\min}}$. Математический анализ уравнения (24) показал, что сечение с минимальным значением расстояния H_{A-A} определяется следующим образом.

$$D_{\Pi} = 2 \cdot \sqrt{\sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\gamma) + \cos^2(\varphi) \cdot \cos^2(\beta)} \cdot \left(H - \Delta - \frac{S}{\sqrt{\sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\gamma) + \cos^2(\varphi) \cdot \cos^2(\beta)}} - 0,5 \cdot d \right) \quad (25)$$

где H – кратчайшее расстояние между осью валка и прокатки;

Δ – величина зазора между подушкой и металлом (5 - 10) мм;

S – толщина стенки подушки (10 – 15) мм;

d – диаметр раската

$$L_{H_{\min}} = P \frac{\sin(\gamma)}{\sin^2(\gamma) + \sin^2(\beta)\cos^2(\gamma)} \quad (26)$$

Расстояние $L_{H_{\min}}$ различно для каждой настройки стана. Для станов с углами подачи до 10° и раскатки до 7° , применяемых, в основном для раскатки труб [49], сечение с минимальным значением H находится за пределами валкового узла. В этом случае внутренний диаметр определяется в сечении $A - A$, проходящем через задний конец подшипниковой опоры.

На рисунке 14 приведены графики изменения внутреннего диаметра первой опоры при углах подачи $\beta = 0^\circ - 30^\circ$ и раскатки $\gamma = 0^\circ, 4^\circ, 10^\circ$ для стана с максимальным диаметром валков, равным 350 мм, минимальным диаметром калибра $D_k^{\min} = 70$ мм, толщиной стенки подушки $S = 15$ мм и зазором между заготовкой и подушкой валка $\Delta = 10$ мм.

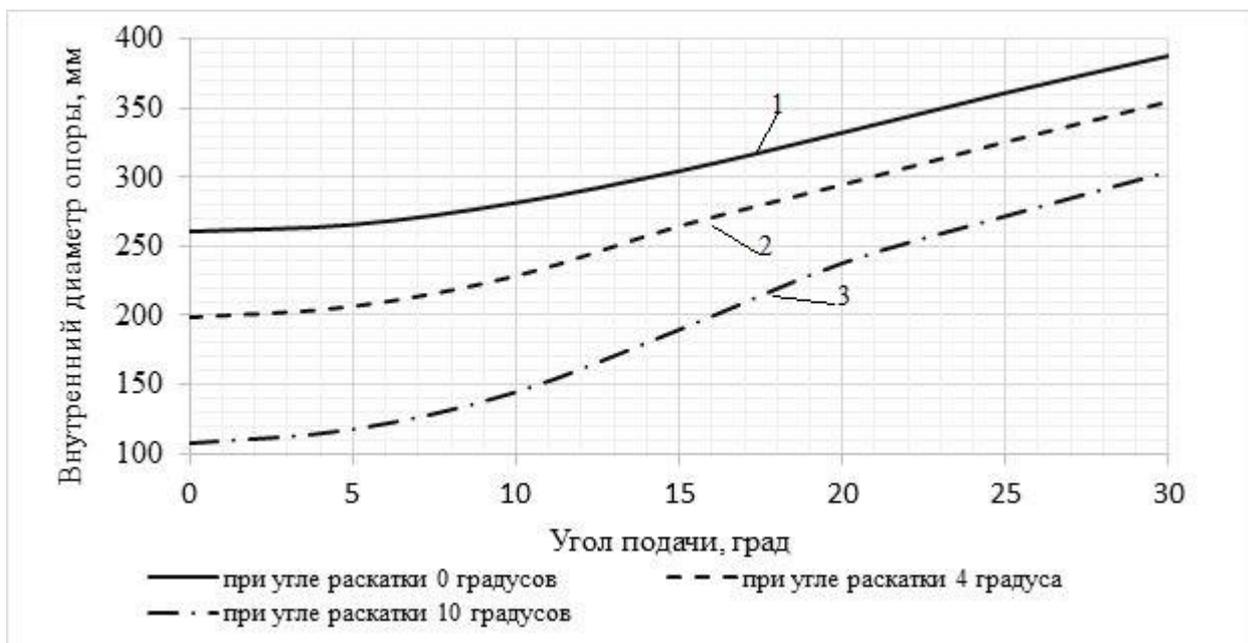


Рисунок 14 – Зависимость внутреннего диаметра $D_{\text{вн}}$ первой опоры от угла подачи β при различных значениях угла раскатки:

$$1 — \gamma = 0^\circ; 2 — \gamma = 4^\circ; 3 — \gamma = 10^\circ$$

Повысить грузоподъемность подшипниковых опор можно путем увеличения их внутреннего диаметра посредством перемещения валка вдоль оси прокатки относительно оси поворота на угол подачи. На рисунке 15 представлена схема валкового узла, со смещенным валком относительно оси барабана на величину δ вдоль оси ox в сторону первой опоры. Пунктирной линией показано первоначальное положение валкового узла относительно оси поворота валка на угол подачи. Расстояния H_{A-A} первой и H_{B-B} второй опоры определяются с учетом смещения валка, т. е. с учетом параметра $P_{\text{смещ}}$ и расстояний $L_{1\text{смещ}}$, и $L_{2\text{смещ}}$.

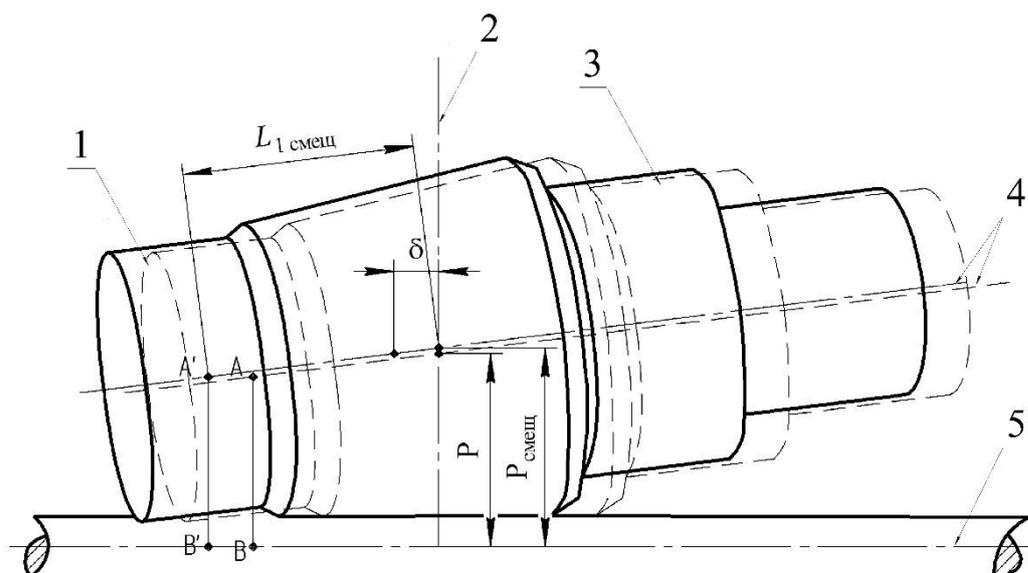


Рисунок 15 – Схема валкового узла со смещенным относительно оси барабана валком:

1 — первая опора; 2 — ось поворота валка на угол подачи (ось барабана); 3 — вторая опора; 4 — ось валка; 5 — ось прокатки

Для примера приведен расчет внутреннего диаметра подшипниковых опор калибровочного стана ТПА 70-270 [19].

Техническая характеристика трехвалковой клетки правильно-калибровочного стана ТПА 70-270:

Диаметр бочки валка, мм	330;
Длина бочки валка, мм	600;
Угол, град:	
подачи	10;
раскатки	6;
Диаметр калибра, мм	75...270.

Расчетные значения внутреннего диаметра первой опоры и диаметры роликовых подшипников по ГОСТ 6364–78 [62] при различном смещении валка относительно оси барабана представлены на графике рисунка 16.

Минимальный диаметр калибра принят равным 70 мм, толщина стенки подушки в области прохождения проката $S = 15$ мм, зазор между заготовкой и подушкой $\Delta = 10$ мм.

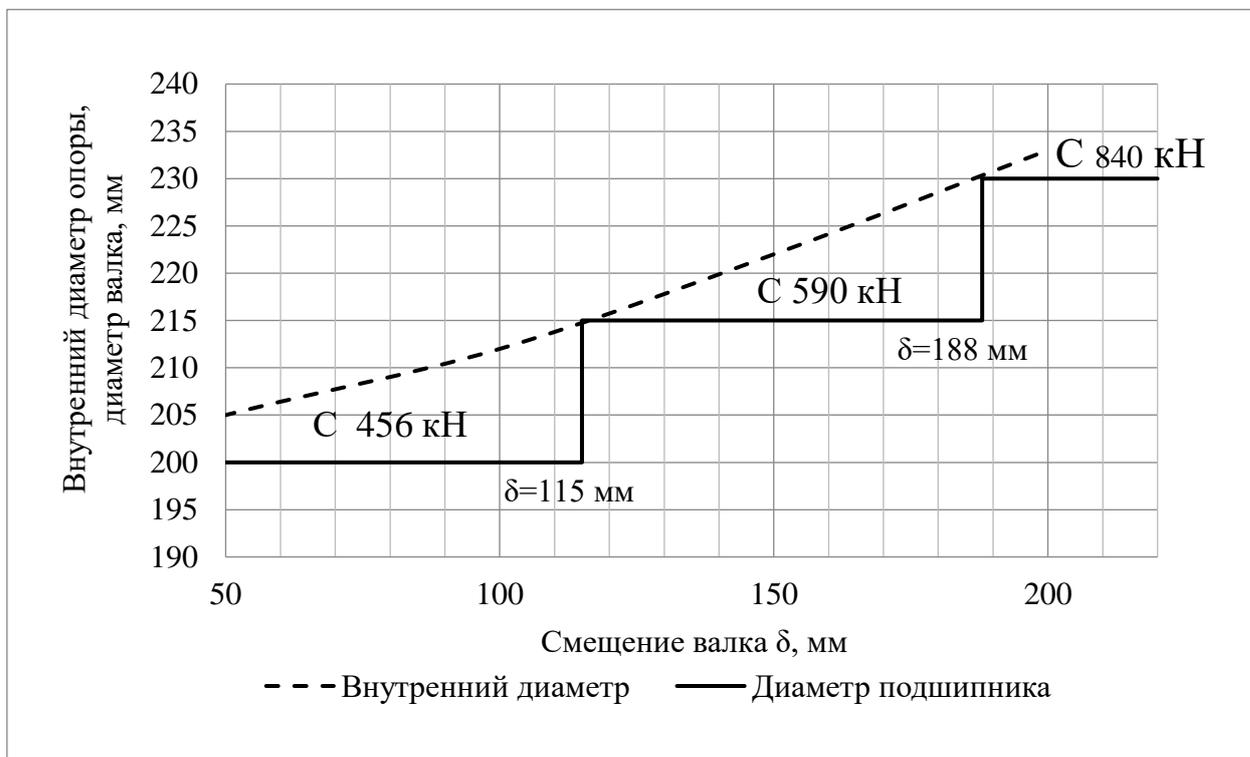


Рисунок 16 – Изменение внутреннего диаметра первой опоры $D_{вн}$ (1) и диаметра подшипника D (2) при смещении вала на расстояние δ

Смещение вала более чем на 84 мм позволяет заменить роликовый подшипник с наружным диаметром 200 мм на аналогичный с диаметром 210 мм. При $\delta = 140$ мм диаметр подшипника можно увеличить на 20 мм, а при $\delta = 188$ мм и более, можно использовать подшипник диаметром 230 мм. Максимальное перемещение вала определяется конструктивными особенностями валкового узла и ограничивается размерами второй подшипниковой опоры. Представленный метод расчета подшипниковых опор лег в основу разработанной компьютерной программы [63]. Все представленные методики используются в учебном процессе на кафедре ОМД (приложение 1).

Глава 3. Компьютерное моделирование прокатки полых заготовок на трехвалковом стане

Разработка компьютерной модели процессов прокатки на трехвалковом стане осуществлена с использованием программ DEFORM и QFORM [64]. Обе программы используют численный метод конечных элементов [65-67], что делает возможным их совместное применение при решении задач. Объектом компьютерного моделирования являются процессы: раскатки, калибровки и калибровки с повышенными обжатиями по диаметру на трехвалковом стане винтовой прокатки.

Основные задачи моделирования:

- разработать конечно-элементной модели процессов раскатки и калибровки труб в трехвалковом стане винтовой прокатки;
- проверка адекватности результатов компьютерного моделирования;
- комплексные исследования влияния отношения диаметра к толщине стенки трубы, угла подачи, раскатки, калибровки рабочих валков на формоизменение металла в очаге деформации, геометрические размеры деформационные и энергосиловые параметры раскатки труб на оправке.

3.1 Методика компьютерного моделирования

Разработка и проверка адекватности компьютерного моделирования процессов прокатки на трехвалковом стане осуществляется согласно ГОСТ Р 57412–2017 [68]. Для каждого процесса прокатки разработаны компьютерные модели и осуществлена проверка их адекватности.

Разработка компьютерной модели начинается с подготовительного этапа, который включает построение трехмерных моделей заготовки, рабочих валков, оправки и иного вспомогательного инструмента. Трехмерные модели разработаны в программе SOLIDWORKS [69]. Программа обеспечивает возможность полного построения трехмерной модели и осуществление позиционирования объектов участвующих в моделировании.

Подготовительный этап моделирования включает следующие основные действия:

- а) расчет калибровки валков и очага деформации;
- б) проработка эскизного чертеж очага деформации;
- в) построение трехмерной модели объектов участвующих в моделировании;
- г) позиционирование объектов;
- е) проверка корректности геометрии очага деформации.

Установка фиксированных и корректируемых параметров, т.е. установка начальных, граничных условий для решения комплекса краевых задач осуществляется в препроцессоре программы моделирования. К фиксированным параметрам относятся:

- тип задачи;
- реологическая модель деформируемой среды;
- материал заготовки, рабочего инструмента;
- кинематические условия (скорость движения рабочего инструмента, его направление);
- геометрические параметры очага деформации;
- температура окружающей среды;

Корректируемые параметры – параметры, которые можно корректировать для достижения необходимой точности результатов моделирования при проверке адекватности, к таким относятся:

- форма конечного элемента сетки;
- настройка дискретизации сетки конечных элементов заготовки и инструмента;
- температура заготовки, рабочего инструмента;
- условия теплообмена и теплопроводности заготовки, инструмента и окружающей среды;
- условия трения на контактной поверхности заготовки и инструмента;
- параметры оптимизации решения задачи.

Для проверки адекватности, выбраны следующие аспекты моделирования, включающие:

- параметры формоизменения металла в очаге деформации;
- энергосиловые параметры.

Проверка адекватности компьютерного моделирования процесса прокатки в QFORM и DEFORM осуществлялась для каждого процесса прокатки путем сравнения параметров реального объекта моделирования с параметрами компьютерного моделирования. Параметры объекта моделирования получены при помощи экспериментальной прокатки на стане в лабораторных и промышленных условиях.

К аспектам формоизменения относится изменение формы гильзы в очаге деформации при ее прокатке. Основными параметрами данного аспекта являются радиусы раската заторможенной гильзы при входе в контакт металла с валком – r_A и радиус заторможенной гильзы под валком r_B смотри схему рисунка 7, а также овальность гильзы в очаге деформации, которая характеризует смещение металла в межвалковое пространство при прокатке гильзы. Компьютерную модель можно считать адекватной с точки зрения аспекта формоизменения, если разница между результатами компьютерной модели и результатами, полученными при экспериментальной прокатке, не превышает 10 % [68].

Ниже рассмотрена проверка адекватности компьютерной модели процесса безправочной прокатки. Проверка адекватности процессов раскатки и калибрования проводилась аналогично.

Для проверки адекватности безправочной прокатки на трехвалковом стане осуществлена экспериментальная прокатка гильз диаметром 90 мм с толщиной стенки 13 мм ($D/S=7$) на полупромышленном трехвалковом раскатном стане МИСиС 130. Материал гильз – сталь 40Х. Перед прокаткой, гильзы нагревались в камерной электрической печи до температуры 950°С. Деформация гильз по диаметру составляло 25 %.

Основной задачей экспериментальной прокатки является получение заторможенных гильз, по которым осуществлялась оценка исследуемых: формоизменения и энергосиловых параметров. На рисунке 17 представлены заторможенные гильзы.



Рисунок 17 – Заторможенные гильзы полученные при безопрвоочной прокатке на стане МИСиС 130 Т

Определение радиусов r_A и r_B заторможенных гильз в зоне контакта металла с валком осуществлялось согласно схеме рисунка 18. Точка A – точка начала контакта металла с валком в поперечном сечении. Радиус r_A , проведенный в точку A . Точка B соответствует кратчайшему расстоянию от оси прокатки (точка O) до поверхности валка. Радиус, проведенный в эту точку – r_B , является радиусом гильзы под валком или радиусом калибра очага деформации в рассматриваемом поперечном сечении.

При выключении двигателей стана, за счет проворачивания валков в обратном направлении, которое обусловлено снятием крутящего момента и упругих деформаций в шпинделе, участок BC обжимается, а в точке B образуется складка, позволяющая определить расположение этой точки на получив-

шемся образце. Геометрическое местоположение точек B в каждом из рассмотренных сечений является границей между участками: AB – входным и BC – выходным на образце. Участок BC' является выходным участком в процессе прокатки и образуется в результате смещения металла в межвалковое пространство. Следует отметить, что положение точки C' на образце найти невозможно. Подробно методика определения радиусов раската представлена в работе [70].

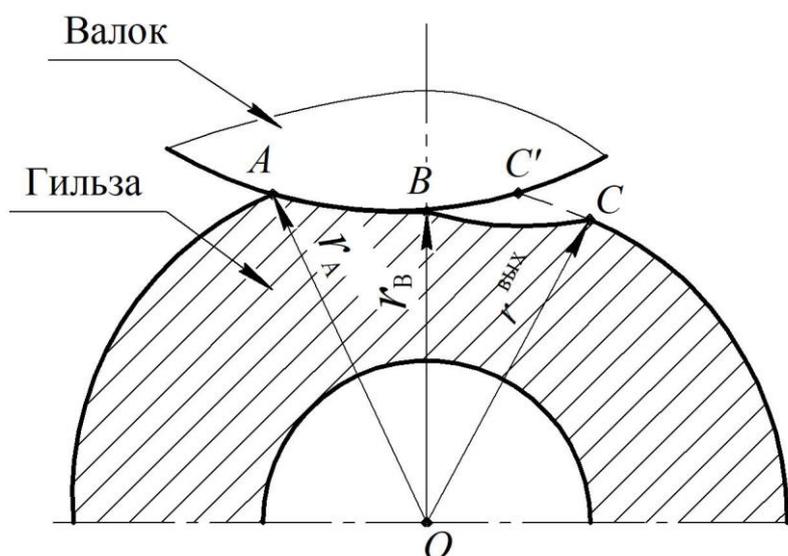


Рисунок 18 – Поперечное сечение очага деформации, схема к определению ширины контактной поверхности

В таблице 4 представлены геометрические размеры заторможенных гильз, полученных на стане МИСиС 130, а также размеры гильз, полученных компьютерным моделированием в DEFORM и QFORM. На рисунках 19–20 представлены графики распределения радиусов r_A и r_B по длине очага деформации для гильзы и их компьютерных моделей.

Результаты сравнения радиусов, полученных экспериментально и моделированием, показывают, что максимальное расхождение по значениям радиусов гильзы под валком составляет 4 %, а радиусов r_A – 4,5 %. Разница по радиусам не превышает 10 %, следовательно компьютерная модель процесса безоправочной прокатки может считаться адекватной по формоизменению. На

рисунке 21 представлен график овальности заторможенной гильзы полученной экспериментальной прокаткой и гильз, полученных моделированием в DEFORM и QFORM.

Таблица 4 – Геометрические параметры заторможенных гильз

Длина очага деф.	Заторможенная на стане МИСиС 130 гильза			Компьютерная модель в DEFORM			Компьютерная модель в QFORM		
	r_B , мм	r_A , мм	$\xi = r_A / r_B$	r_B , мм	r_A , мм	$\xi = r_A / r_B$	r_B , мм	r_A , мм	$\xi = r_A / r_B$
0	45,4	45,4	1,00	45,4	45,4	1,00	45,0	45	1,00
9,7	42,9	44,5	1,04	43,8	44,5	1,02	43,2	44,6	1,03
19,4	40,5	43,4	1,07	41,9	44	1,05	41,5	43,4	1,05
29,1	38,5	41,3	1,07	40	42,6	1,07	39,3	41	1,04
38,8	36,5	39,3	1,08	38,6	40,3	1,04	37,4	39,4	1,05
48,5	34,8	37,5	1,08	37	38,7	1,05	35,9	38	1,06
58,2	33,6	35,7	1,06	35,3	37,3	1,06	34,8	36,2	1,07
67,9	33,3	34,5	1,04	33,7	35,7	1,06	33,9	34,8	1,04
77,6	33	34,4	1,04	33,1	34,3	1,04	33,6	33,9	1,03
87,3	32,8	34,2	1,04	32,9	33,2	1,01	33,6	33,9	1,01
97,0	32,6	34,0	1,04	32,8	33,2	1,01	33,6	33,8	1,02
106,7	32,4	33,8	1,04	32,7	33,0	1,01	33,4	33,6	1,01
116,4	32,3	33,5	1,04	32,8	33,0	1,01	33,5	33,5	1,00
126,1	32,5	33,4	1,03	32,7	33,0	1,01	33,5	33,5	1,00
135,8	32,9	33,1	1,01	32,8	33,0	1,01	33,5	33,5	1,00
145,5	32,9	32,9	1,00	32,9	33,0	1,00	33,5	33,5	1,00

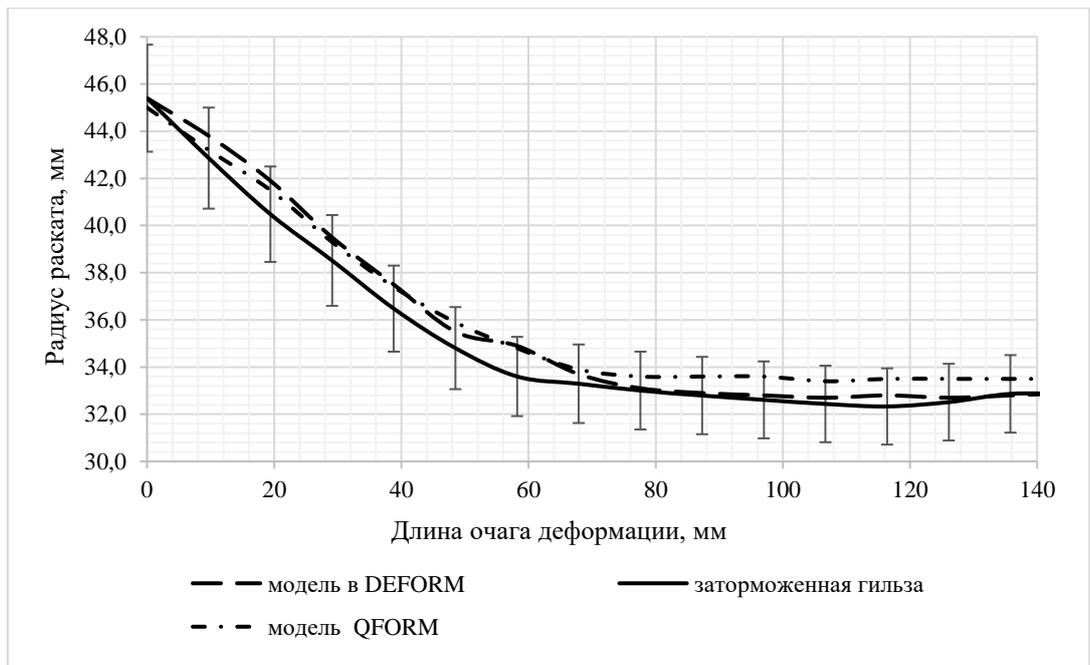


Рисунок 19 – Радиусы r_B гильзы под валком

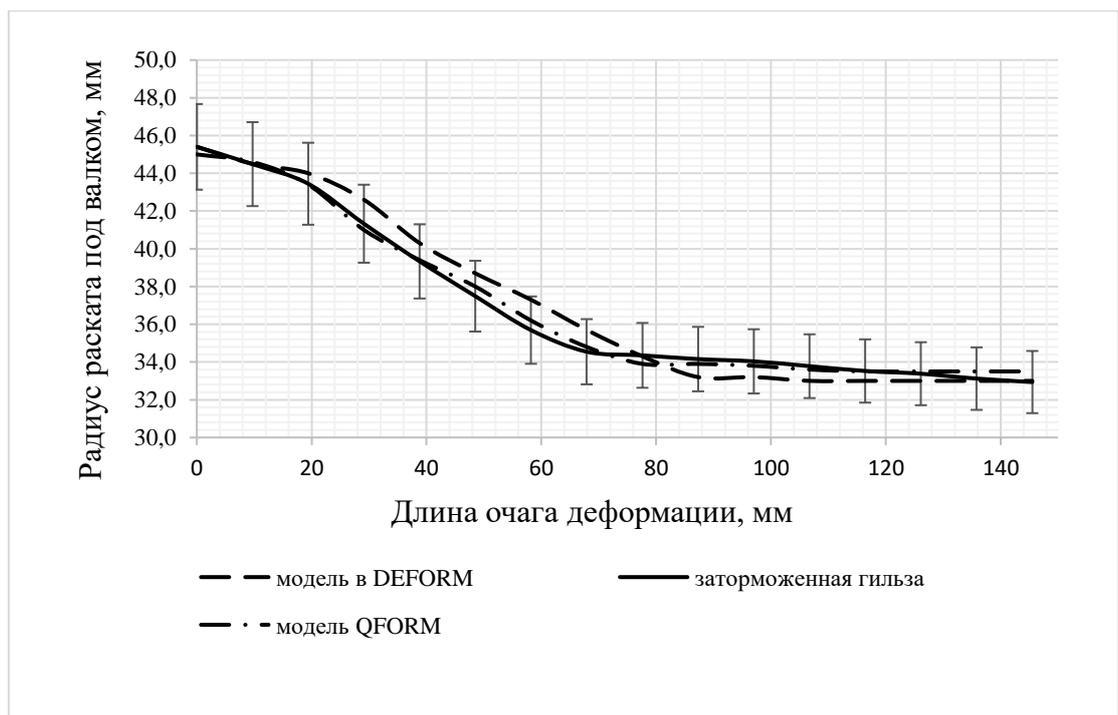


Рисунок 20 – Радиусы r_A

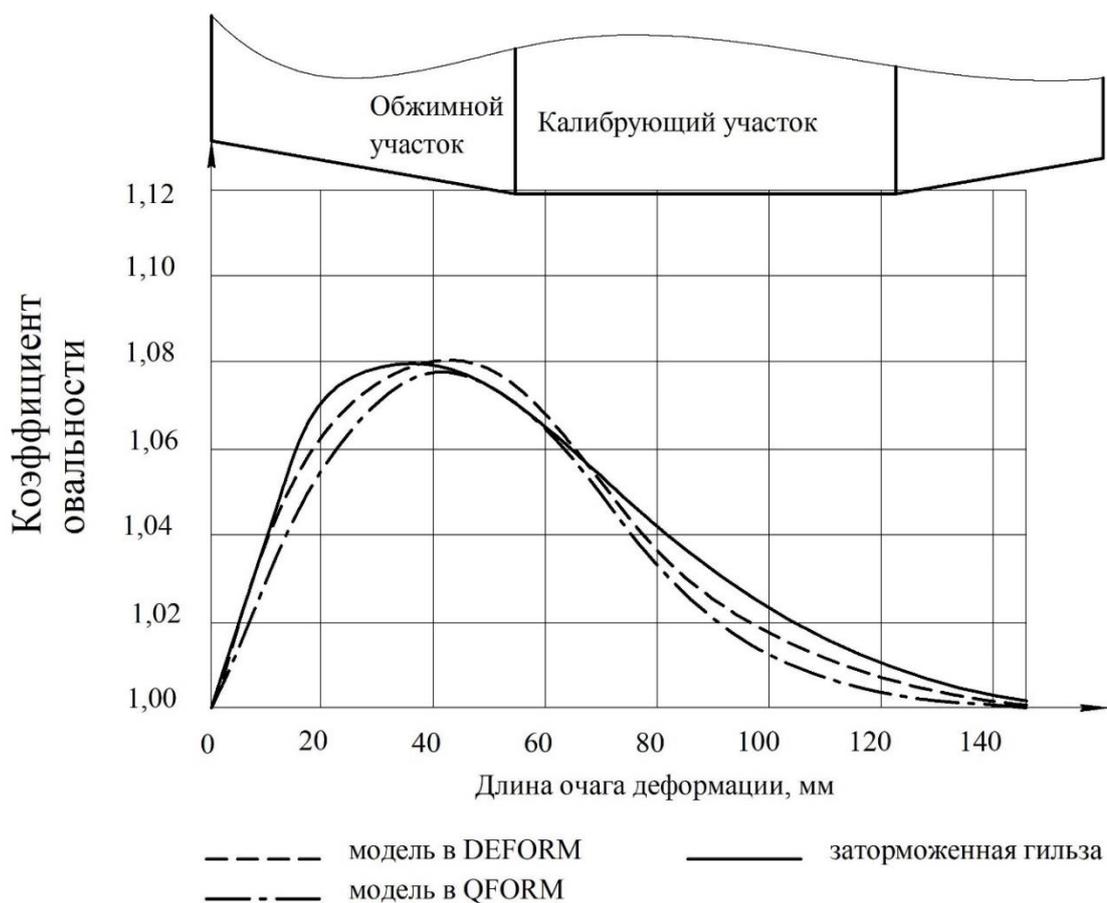


Рисунок 21 – Распределение коэффициента овальности гильз по длине очага деформации

Из графиков видно, что максимальная овальность в конце обжимного участка не превышает 1,080 для экспериментальной прокатки и 1,075 для моделирования в QFORM. Значения овальности близки и имеют хорошую сходимость, что подтверждает адекватность компьютерной модели по формоизменению.

Мощность на приводе вала с учетом потерь на механическую передачу и потерь холостого хода составляет 52 кВт. Согласно результатам компьютерного моделирования в DEFORM и QFORM с учетом потерь на механическую передачу применительно к условиям стана МИСиС130, мощность составляет 47 кВт. Суммарная мощность, полученная при моделировании с учетом потерь, составляет 141 кВт. Суммарная мощность, потраченная при прокатке

гильзы на стане, составляет 156 кВт. Разница по суммарной мощности с учетом потерь на механическую передачу составляет 9,6 %. При моделировании в QFORM мощность с учетом потерь составляет 133 кВт разница между значениями составляет 15 %.

Аналогичным образом проверялась адекватность модели процесса калибровки применительно к условиям ТПА-160. На калибровочном трехвалковом стане ТПА-160 при калибровке трубы диаметром 90 мм с обжатием по диаметру 3 мм, получена заторможенная труба см. рисунок 22.

Измерения радиусов r_A и r_B черновой недокатанной трубы осуществлялся аналогично заторможенной гильзы на стане МИСиС 130. Максимальное значение овальности составляет 1,009 для заторможенных в калибровочном стане труб и 1,007 для заторможенных труб, полученных при моделировании в DEFORM и QFORM.

Наибольшее отклонение в значениях r_B составляет 1,5 %, а в значениях r_A – 1,7 %. Результаты моделей по формоизменению близки к реальным значениям и соответствуют установленным критериям проверки адекватности.



Рисунок 22 – Заторможенный образец в калибровочном стане ТПА 160

3.2 Исследование процесса раскатки труб

Как было отмечено во второй главе, в процессе раскатки трубы на оправке выделяются две зоны: редуцирования и обжатия. Исследовать режимы раскатки труб с повышенным обжатием по диаметру необходимо с учетом рассмотренных зон. Для решения задачи, связанной с исследованием влияния отношения диаметра к толщине стенки трубы, угла подачи, раскатки, на деформационные и энергосиловые параметры раскатки труб на оправке проведен ряд моделирований процесса раскатки труб с D/S равным 8, 10, 12.

Моделирование процесса раскатки осуществлялось в валках с углом конусности входного участка к оси прокатки 3° , гребнем высотой 12,5 мм и углом наклона к оси прокатки 42° , калибрующим участком длиной 90 мм, выходным участком с углом наклона образующей к оси прокатки -3° .

В качестве полых заготовок выбраны гильзы из шарикоподшипниковой стали ШХ-15, с исходной температурой 1100°C . В таблице 5 представлены размеры исходных гильз, диаметры оправок и размеры получаемой трубы.

Таблица 5 – Размеры гильз и труб

Размеры гильз			Диаметр оправки	Размеры черновых труб		
D_g , мм	S_g , мм	D/S		D_T	S_T	D/S
179	33,5	5,3	106,4	150	18,8	8,0
179	29,6	6,0	114,0		15,0	10,0
181	28,0	6,5	119,0		12,5	12,0
181	25,3	7,2	130,4		9,5	16,0

3.2.1 Исследование овальности при раскатке

В процессе моделирования раскатки труб выяснено, что на коэффициент овальности существенное влияние оказывает отношение диаметра к толщине стенки получаемой трубы. Раскатка толстостенных труб сопровождается меньшей овальностью гильзы в очаге деформации, а тонкостенных – большей.

На рисунке 23 представлен поперечный разрез очага деформации в сечении с максимальным коэффициентом овальности в установившемся режиме прокатки и при раскатки заднего конца. При раскатке заднего конца овальность трубы увеличивается. Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что овальность гильзы в очаге деформации не постоянна и увеличивается при раскатке заднего конца. Подробное описание исследований и результаты представлены в работе [71].

При раскатке толстостенных труб с D/S равным 8 и 10, (рисунок 23 а, б) наблюдалось небольшое смещение металла в межвалковое пространство. При раскатке труб с D/S 12 и 16 (рисунок 23 в, г), смещение металла в межвалковое пространство становится больше, и достигает предельного значения. При этом образуется смятие заднего конца и образование дефекта «трехгранный рас-труб» [2,5,6].

Чем выше отношение D/S , тем больше коэффициент овальности ξ , что характерно для всех стадиях процесса раскатки. Так при раскатке переднего конца гильз, ξ увеличивается с 1,20 (D/S равным 8) до 1,63 (D/S равным 16). При выходе переднего конца из очага деформации (установившейся режим) коэффициент ξ уменьшается до 1,14 (D/S равным 8) и 1,45 (D/S равным 16). При раскатке заднего конца, ξ увеличивается до 1,32 (D/S равным 8) и 1,71 (D/S равным 16). При раскатке трубы с $D/S=10$, максимальное значение ξ в установившемся режиме составляет 1,22, а при раскатке трубы с $D/S=12$ – 1,27.

На рисунке 24 представлен график изменения максимального значения овальности в зависимости от D/S получаемой трубы в установившемся режиме прокатки.

В результате аппроксимации, получено эмпирическое выражение для определения максимального значения коэффициента овальности:

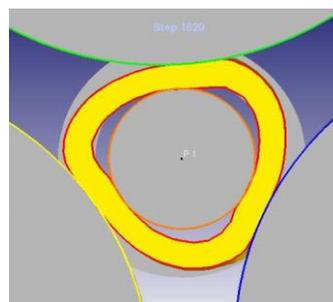
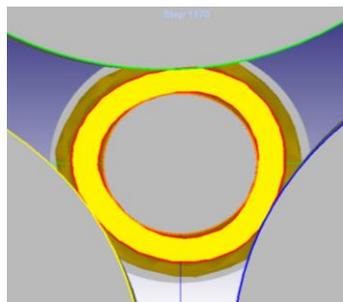
$$\xi_k^{max} = a \cdot e^{m \cdot D/S} \quad (27)$$

где a – коэффициент режима раскатки;

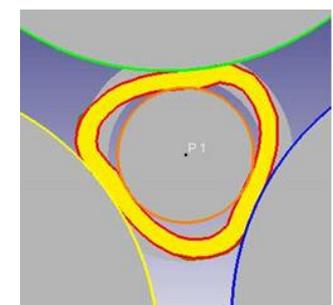
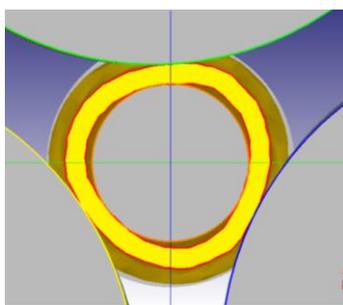
m – параметр, зависящий от размеров трубы, определяется экспериментально
 $e - 2,718$

Коэффициент a указывает в каком режиме прокатки производится вычисления максимального значения коэффициента овальности – ξ^{max} . Для установившегося режима (при полном заполнении очага деформации металлом) a равен (0,95 – 1,00). При прокатки переднего конца гильзы (в момент начала процесса раскатки) a равен (1,05 – 1,12), а при раскатки заднего конца (в момент освобождения очага деформации) a равен (1,12 – 1,16).

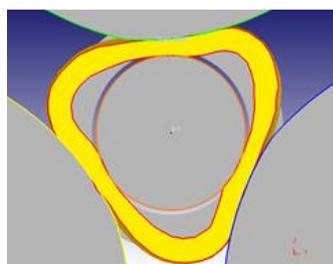
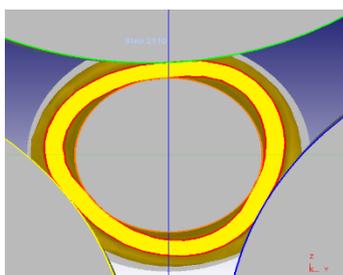
Коэффициент m при D/S определяет пологость кривой, зависит от различных факторов процесса раскатки, и в особенности от значений угла подачи.



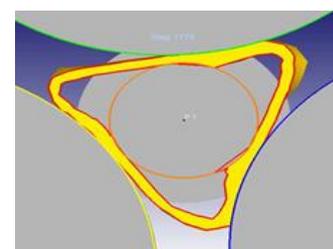
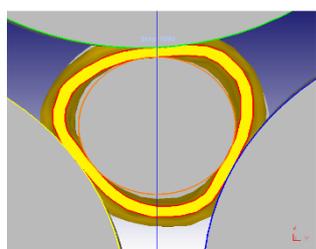
а



б



в



установившейся режим

прокатка заднего конца

г

а – $D/S=8$; б – $D/S=10$; в – $D/S=12$; г – $D/S=16$

Рисунок 23 – Формоизменение металла в очаге деформации раскатного стана

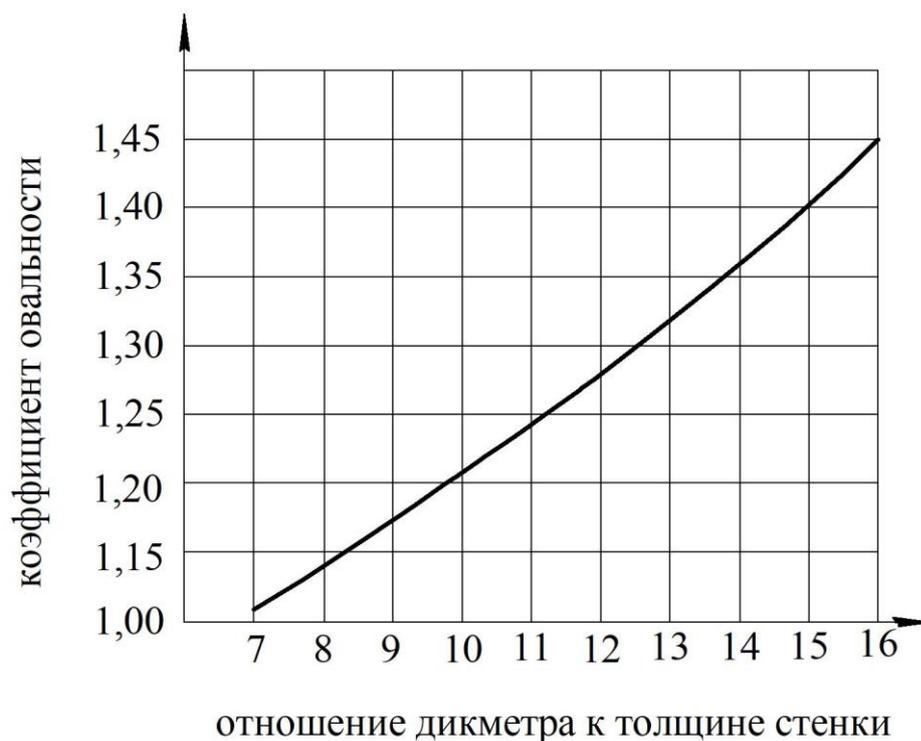


Рисунок 24 – Максимальный коэффициент овальности трубы по длине очага деформации в установившемся режиме

3.2.2 Угол подачи

На практике при раскатке гильзы в трубу применяются углы подачи до 10° , при этом раскатку тонкостенных трубы с D/S больше 7 осуществляют на малых углах подачи $4^\circ-6^\circ$ [3,5-6].

Смоделирован процесс раскатки трубы с $D/S = 12$ на различных углах подачи. В таблицах 6 и 7 представлены результаты моделирования.

Таблица 6 – Коэффициент овальности

Угол подачи валков β , град	Коэффициент овальности		
	в зоне редуцирования входного участка	перед гребнем валка	максимальное значение
4	1,02	1,06	1,10
6	1,04	1,10	1,15
8	1,04	1,10	1,16
10	1,06	1,19	1,35

Определение овальности производилось в зоне редуцирования входного участка очага деформации, на участке перед гребнем валка и в сечении с максимальным значением коэффициента овальности на калибрующем участке. Для проверки значимости влияния угла подачи был проведен дисперсионный анализ результатов, подробно описанный по методике [72].

Проверка значимости влияния угла подачи на овальность гильз в зоне редуцирования и обжатия стенки гильзы перед гребнем показало, что овальность раската на этих участках в малой степени зависит от угла подачи. Однако угол подачи в большей степени влияет на максимальное значение коэффициента овальности. Такой характер зависимости овальности от угла подачи связан с особенностью деформирования гильзы гребнем валка.

Резкое изменение овальности происходит, когда средний шаг подачи заготовки в зоне гребня валка – L_{cp} становится больше длины гребня валка – $L_{г}$, при этом, частное обжатие по стенке гильзы на вершине гребня валка превышает значение высоты гребня, что влияет на характер деформационных параметров, при этом наблюдается интенсивное увеличение овальности гильзы. Соотношение (27) позволяет определить граничное значение угла подачи – $\beta_{гр}$, при котором наблюдается интенсивное увеличение овальности в очаге деформации для заданных параметров очага деформации и режимов обжатия:

$$\beta_{гр} = \arctg \left(\frac{L_{г}}{\frac{1}{3} \pi D_{т} \frac{\eta_{о}}{\eta_{т}}} \cdot \left(\frac{\mu_{I-I}}{\mu_{\Sigma}} \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \quad (27)$$

где $L_{г}$ – длина гребня валка;

$D_{т}$ – диаметр готовой трубы;

μ_{I-I} – коэффициент вытяжки в основании гребня;

μ_{Σ} – суммарный коэффициент вытяжки;

$\eta_{о}$ – коэффициент осевой скорости;

$\eta_{т}$ – коэффициент тангенциальной скорости.

Следует отметить, что параметр m уравнения (26) зависит от представленного условия (27), поскольку наблюдается значительное увеличение максимальной овальности гильзы. Экспериментальные исследования и анализ компьютерного моделирования процесса раскатки показывает, что в процессе раскатки с углом β больше $\beta_{гр}$ параметр m в уравнении (26) может меняться в пределах (0,020 – 0,025), в противном случае m – (0,010 – 0,015).

С изменением угла подачи, энергосиловые параметры так же меняются. В таблице 7 представлены значения энергосиловых параметров, полученных при помощи моделирования процесса раскатки на различных углах подачи.

Таблица 7 – Энергосиловые параметры

Угол подачи β , град	Сила металла на валок P_{cp} , кН	Крутящий момент на валке $M_{кр}$, кН·м	Мощность на валке N , кВт
4	508	22	342
6	510	22	342
8	609	26	407
10	776	33	516

С изменением угла подачи от 4° до 10° градусов усилие металла на валок изменяется на 34 %, крутящий момент на 33 %. Согласно тензометрическим исследованиям процесса раскатки труб диаметром 83 × 12 мм из стали ШХ 15 и 102 × 9 мм из стали 35 проведенные в работе [48] видно, что изменение угла подачи и высоты гребня валка приводит к увеличению усилие металла на валок, крутящий момент. Согласно [48] изменение угла подачи с 5° до 8°, при высоте гребня валка 12,5 мм приводит к увеличению усилия с 450 кН до 570 кН т.е. на 21 %, а крутящий момент с 17 кН·м до 30 кН·м т.е. на 43 %.

Результаты тензометрического исследования и компьютерного моделирования процесса соответствуют друг другу. Угол подачи влияет на энергосиловые параметры процесса раскатки, а также на максимальную величину овальности раската.

3.2.3 Угол раскатки

Угол раскатки является одним из параметров очага деформации станов винтовой прокатки, приводящих к изменению геометрии очага деформации, как следствие влияет на процесс формоизменения металла.

Для проверки значимости влияния угла раскатки на формоизменение металла и параметров процесса раскатки, был смоделирован процесс раскатки труб в валках с углом раскатки – $\gamma = 12^\circ$ по чашевидной и грибовидной схемам.

Кривые изменения коэффициента овальности по длине очага деформации при чашевидной и грибовидной схемах с углом раскатки 12° и бочковидной схеме представлены на рисунке 25.

При угле раскатки 12° по чашевидной схеме, максимальное значение овальности равно 1,38. При грибовидной схеме с углом раскатки 12° коэффициент овальности составляет 1,25. Минимальная овальность гильзы наблюдается при угле раскатки 0° – бочковидная схема раскатки.

При чашевидной схеме, овальность резко увеличивается на калибрующем участке. При $\gamma = 12^\circ$ по грибовидной схеме, овальность гильзы на калибрующем участке очага деформации уменьшается на (1 – 3) % по сравнению с раскаткой в бочковидных валках.

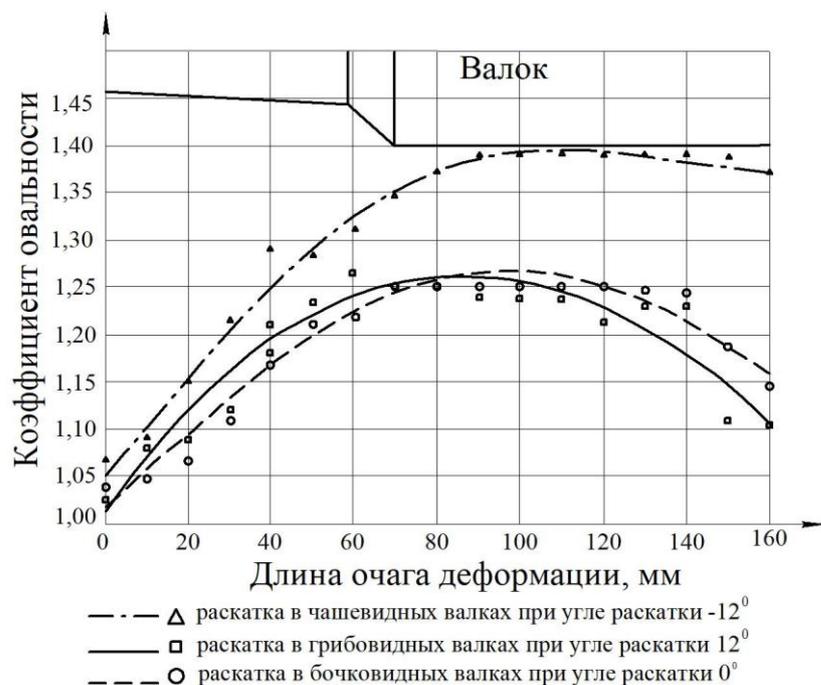


Рисунок 25 – Распределение коэффициента овальности по длине очага деформации при чашевидной, бочковидной и грибовидной схемах

3.3 Исследование процесса калибрования

Основными задачами моделирование процесса безправочной прокатки или калибрования с повышенными обжатиями по диаметру является исследование влияния: угла наклона обжимного участка к оси прокатки; применение вала с гребнем; угла подачи на изменение толщины стенки трубы, точность труб по диаметру и толщине стенки, мощность и момент прокатки.

Параметры калибрования:

Гильза:

Диаметр, мм	106
Толщина стенки, мм	15,1
D/S	7
Материал	40X
Угол подачи $^\circ$	10
Обжатие по диаметру, %	17
Температура калибрования $^\circ\text{C}$	950

3.3.1 Калибровка обжимного участка

При разработке калибровки рабочих валков необходимо определить рациональные значения угла наклона образующей обжимного участка валка к оси прокатки – φ . Проведено исследование влияния калибровки обжимного участка валка, а также применения валка с гребнем на изменение толщины стенки трубы, точность геометрических размеров труб и энергосиловые параметры прокатки. В таблице 8 представлены геометрические параметры полученных в результате моделирования труб (см. параметры калибрования). Максимальная разностенность труб наблюдается при редуцировании в валках с углами наклона образующей обжимного участка к оси прокатки 1° . В остальных случаях, разностенность варьируется в пределах 3-4 %.

На рисунке 26 представлены график изменения толщины стенки с увеличением угла φ . С увеличением угла φ интенсивность увеличения толщины стенки становится больше, следовательно угол τ , характеризующий интенсивность изменения толщины стенки (см. пункт 2.2), увеличивается. При значениях φ равных 1° - 5° , толщина стенки увеличилась на 4,6-9,2 % соответственно, а при увеличении φ с 7° до 10° – на 10,0-11,5 % соответственно.

В таблице 9 представлены значения мощности и момента прокатки на одном валке при калибровании с повышенными обжатиями по диаметру.

Таблица 8 – Геометрические параметры

Угол наклона образующей обжимного участка валка к оси прокатки, град.	Диаметр		Толщина стенки		
	Среднее значение, мм	Максимальное отклонение от среднего значения %	увеличение толщины стенки, мм	увеличение толщины стенки, %	разностенность, %
1	87,0	0,4	0,70	4,6	8,6
5	86,8	0,6	1,39	9,2	3,9
7	86,8	0,4	1,51	10,0	3,3
10	86,5	0,4	1,74	11,5	3,2
5 (с гребнем)	86,7	0,8	2,12	14,1	4,9

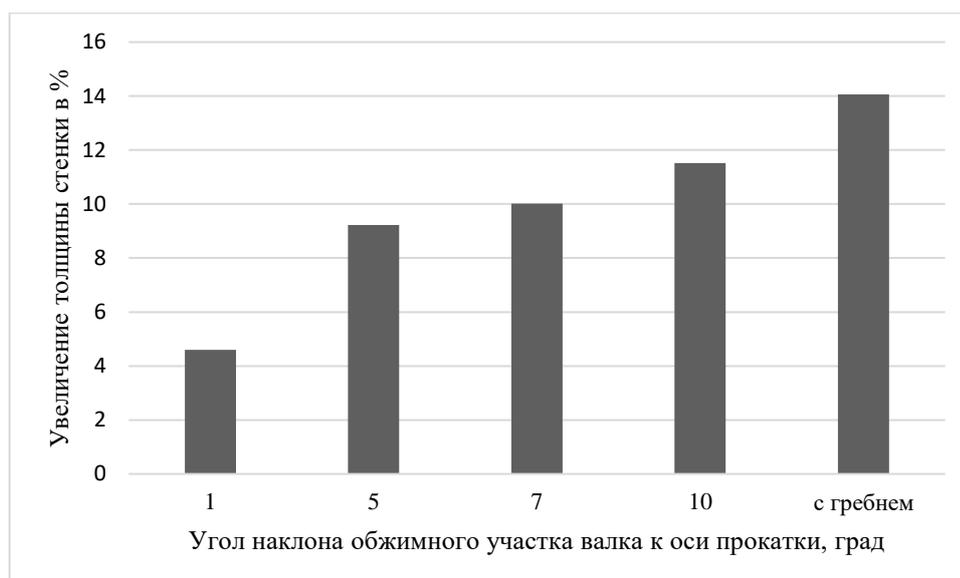


Рисунок 26 - Увеличение толщины стенки

Таблица 9 – Мощность, момент прокатки

Угол наклона образующей обжимного участка валка к оси прокатки град.	Мощность, кВт	Момент прокатки, кН·м
1	92,0	7,0
5	88,4	6,3
7	82,3	6,2
10	82,0	6,2
5 (с гребнем)	92,1	5,0

При малом значении угла конусности, площадь контактной поверхности металла с валком больше, как следствие, увеличивается крутящий момент и мощность процесса. Угол наклона образующей обжимного участка валка к оси прокатки влияет на мощность и момент прокатки меньше, чем на формоизменение, так как основные потери мощности осуществляются на калибрующем участке. При углах φ равных 5° - 10° , разница между значениями мощности и момента прокатки – незначительная.

Осуществлено моделирование безоправочной прокатки гильз в валках с гребнем, имеющим угол наклона образующей к оси прокатки 20° , высотой 5 мм и обжимным участком с углом конусности 5° , суммарное обжатие по диаметру соответствует обжатию в валках с углом конусности 7° . В таблице 9

представлены геометрические параметры трубы. Разностенность составляет 4,9 %, что меньше, чем при прокатке в валках с $\varphi = 1^\circ$, но больше, чем в остальных случаях. По диаметру, труба имеет наибольшее отклонение от среднего значения 0,8 %. При прокатке в валках с гребнем, разностенность труб выше. Толщина стенки трубы изменяется более интенсивно. В таблице 9 так же представлены значения мощности и момента прокатки на одном валке. Момент прокатки – 5 КН·м меньше, чем в других случаях. Наличие гребня, приводит к увеличению частных обжатий в зоне гребня валка, это провоцирует более интенсивное локальное изменению толщины стенки.

С учетом результатов моделирования процесс безправочной прокатки рационально осуществлять в валках без гребня, или участком валка, не имеющим гребень. Это позволит уменьшить увеличение толщины стенки трубы и сохранить ее точность.

3.3.2 Угол подачи

При помощи компьютерного моделирования процесса калибрования с повышенным обжатием по диаметру, осуществлено исследование влияния угла подачи на точность получаемых труб, формоизменение и энергосиловые параметры. Моделирование процесса прокатки осуществлялось при углах подачи 6° , 8° , 10° и 12° согласно параметрам калибрования. В таблице 10 представлены геометрические параметры труб, полученных при моделировании.

При угле подачи 6° толщина стенки увеличилась на 9,0 %, при угле подачи 8° – на 8,9 %, а при угле подачи 10° – на 8,5 %. Абсолютное увеличение толщины стенки меняется от 1,1 мм до 1,6 мм что является незначительной величиной и не выходит за пределы допусков по разностенности. В рассмотренном диапазоне значений углов подачи, нет строгой зависимости между увеличением толщины стенки и изменением углов подачи.

Таблица 10 – Геометрические параметры труб

Угол подачи в град.	Диаметр		Толщина стенки	
	Средний диаметр трубы, мм	Максимальное отклонение от средней величины, %	Увеличение толщины стенки, мм	Увеличение толщины стенки, %
6	87,1	0,9	1,40	9,0
8	87,2	1,2	1,34	8,9
10	87,4	0,9	1,28	8,5
12	87,1	1,0	1,28	8,5

В отличие от угла наклона образующей к оси прокатки, угол подачи оказывает большее влияние на энергосиловые параметры. В таблице 11 представлены значения мощности и момента прокатки при безоправочной прокатки труб с изменением угла подачи.

Таблица 11 – Мощность и момент прокатки

Угол подачи, град	Мощность, кВт	Момент прокатки, кН·м
6	50,2	3,8
8	63,6	4,9
10	76,7	5,9
12	87,2	6,7

Так, при редуцировании трубы с углом подачи 6° , мощность составляет 50,2 кВт, момент прокатки – 3,8 кН·м, а при редуцировании на угле подачи 12° мощность равна 87,2 кВт, момент прокатки – 6,7 кН·м. Полные результаты исследований приведены в работе [71].

3.3.3 Факторный анализ калибрования с повышенным обжатием по диаметру

При калибровании с повышенным обжатием по диаметру, наибольшее влияние на формоизменение, в том числе изменение толщины стенки оказывает величина обжатия гильзы по диаметру и ее отношение диаметра к толщине стенки [18, 24]. Комплексное исследование таких параметров как: угол

наклона обжимного участка к оси прокатки; обжатия по диаметру, и отношение диаметра к толщине стенки гильзы осуществлено с помощью факторного эксперимента [72, 74]. Однофакторное исследование таких параметров как угол наклона образующей обжимного участка к оси прокатки – φ , угла подачи – β показало, что угол подачи не влияет на изменение толщины стенки гильзы, в результате чего был исключен из факторного пространства эксперимента.

Факторный анализ осуществлён при помощи разработанной компьютерной модели процесса редуцирования труб в программе QFORM. В таблице 12 представлены рассмотренные факторы и их варьирование на максимальном «+» и минимальном «-» уровнях.

При проведении факторного эксперимента осуществлялось варьирование отношения угла φ , D/S гильзы, величины обжатия по диаметру, остальные параметры см. (Параметры калибрования).

Согласно плану эксперимента, выполнен расчет восьми задач (далее опытов) безоправочной прокатки труб с различными сочетаниями значений факторов.

Таблица 12 – Значения факторов

Угол наклона образующей обжимного участка валка к оси прокатки φ , град.		Обжатие по диаметру ε_d , %		Отношение D/S	
Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.
10	1	25	5	11	4

Для исследования влияния факторов на изменение толщины стенки при редуцировании составлено уравнение регрессии, которое является математической моделью изменения толщины стенки трубы, учитывающее влияние рассмотренных факторов и их взаимодействие:

$$\Delta S_{\%} = 10,39 - 3,69 \cdot \frac{(\varphi-5,5)}{4,5} + 6,96 \cdot \frac{(\varepsilon_d-15)}{10} + 10,23 \cdot \frac{(\frac{D}{S}-7,5)}{3,5} - 2,39 \cdot \frac{(\varphi-5,5) \cdot (\varepsilon_d-15)}{45} + 7,94 \cdot \frac{(\frac{D}{S}-7,5) \cdot (\varepsilon_d-15)}{45} \quad (28)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии при основных факторах показала, что все рассмотренные факторы значимы и оказывают влияние на изменение толщины стенки. Наибольшее влияние оказывает отношение D/S исходной гильзы. При прокатке тонкостенных гильз интенсивность изменения толщины стенки выше. Следующим по значимости является фактор, описывающий величину обжатия гильзы по диаметру. Следует отметить, что совместное влияние таких факторов как D/S и ε_d оказывает большее влияние на изменение толщины стенки, чем взаимодействие факторов φ и ε_d . Наименьшее влияние на изменение толщины стенки оказывает угол φ .

Наибольшее влияние на коэффициент овальности как на переднем, так и на заднем концах оказывает D/S исходной гильзы. С увеличением D/S устойчивость профиля гильзы снижается, это приводит к увеличению овальности металла в очаге деформации, снижению стабильности процесса, безоправочной прокатки. Увеличение обжатия по диаметру приводит к росту овальности гильзы. Совместное воздействие таких факторов как ε_d и D/S гильзы влияют на величину овальности в большей степени. С увеличением этих факторов увеличивается овальность, а также возникает риск образования неявного гранения. Неявное гранение образовалась в условиях калибрования тонкостенных гильз с обжатием по диаметру 25 %.

В результате проведения факторного анализа были сделаны следующие выводы:

- на формоизменение гильзы в очаге деформации и изменение толщины стенки при калибровании с повышенным обжатием по диаметру наибольшее влияние оказывают такие факторы, как D/S исходной гильзы, обжатие по диаметру – ε_d и угол наклона образующей обжимного участка к оси прокатки – φ ;
- угол подачи - β оказывает незначительное влияние.

Глава 4. Исследование и внедрение процессов раскатки и калибрования с большими обжатиями по диаметру на станах МИСиС 130 и ТПА 160
АО «ПНТЗ»

Разработаны и проведены экспериментальные исследования процессов раскатки и калибрования труб с повышенными обжатиями на трехвалковых станах винтовой прокатки МИСиС 130 и ТПА 160. В условиях ТПА 160 осуществлена серия опытно-промышленных прокаток. Для проверки режимов деформирования с повышенными обжатиями по диаметру в раскатном и калибровочном станах, разработана калибровка рабочих валков. Рабочие валки снабжены дополнительным обжимным или редуционным участком.

4.1 Методика исследования процессов на стане МИСиС 130 и ТПА 160

Экспериментальное исследование процессов раскатки и калибрования с повышенными обжатиями по диаметру осуществлялись в лабораторных условиях на опытно-промышленном стане МИСиС 130 и в промышленных условиях на трехвалковом раскатном и калибровочном станах ТПА 160.

Методика исследования на стане МИСиС 130. В качестве полрой заготовки при исследовании процесса калибрования с повышенными обжатиями по диаметру на стане МИСиС 130 использовались гильзы диаметром 90 мм, толщиной стенки 18, 13 и 9 мм, с соотношением D/S – 5, 7 и 10 соответственно. В таблице 13 представлены размеры гильз, разностенность и отклонение наружного диаметра от средней величины.

Прокатка гильз осуществлялась на лабораторно-промышленном трехвалковом стане винтовой прокатки МИСиС 130.

Выбраны следующие параметры прокатки:

Обжатие гильз по диаметру – ε_d	5, 25 %
Отношение диаметра к толщине стенки гильзы – D/S	5,7,10
Температура нагрева гильз	950 °С
Угол подачи рабочих валков трехвалкового стана, град	13,5

Таблица 13 – Геометрические размеры гильз и их точность

Отношение диаметра к толщине стенки D/S	Параметры гильз			
	Средний диаметр D _г мм	Отклонение наружного диаметра от средней величины ΔD _г %	Среднее значение толщины стенки, S _г мм	Разностенность, ΔS _г %
5	88,9	1,9	17,1	9,4
7	86,5	1,3	13,1	10,7
10	91,0	2,1	9,1	20,9

Прокатка гильзы с D/S=10, обжатием по диаметру 25 % оказалась неудачной. В виду большого смещения металла в межвалковое пространство, гильза была смята, в результате чего застряла в очаге деформации. Для дальнейшего проведения экспериментальных исследований, для тонкостенных гильз с D/S=10 обжатие по диаметру было снижено до 16,5 %, поскольку при таком значении обжатия по диаметру, процесс прокатки осуществлялся стабильно.

Для исследования формоизменения, площади контактной поверхности, в процессе прокатки осуществлено торможение гильз с соотношением D/S равным 7 и 10, обжатием по диаметру соответственно 25 % и 16,5 %.

На рисунке 27 представлена схема очага деформации и валки при безоправочной прокатке на стане МИСиС 130. Суммарное обжатие по диаметру 5 %, 25 % выбрано согласно исследованием, проведенным ранее и представленным в работах [72]. Значение обжатия выше 25 % приводят к потере устойчивости процесса прокатки, образованию гранения, в связи с этим исследование при больших обжатиях является не целесообразно. Поскольку, на ТПА 160 отношение D/S гильз по таблицы прокатки [3, 6] меняется в пределах 4-10, выбран интервал исследований 5-10. Согласно техническим характери-

стикам раскатного и калибровочного стана ТПА 160, максимальный угол подачи не превышает $13,5^\circ$, в связи с этим, а угол подачи в указанном интервале оказывает незначительное влияние на процесс калибрования, то выбран фиксированный угол подачи $13,5^\circ$.

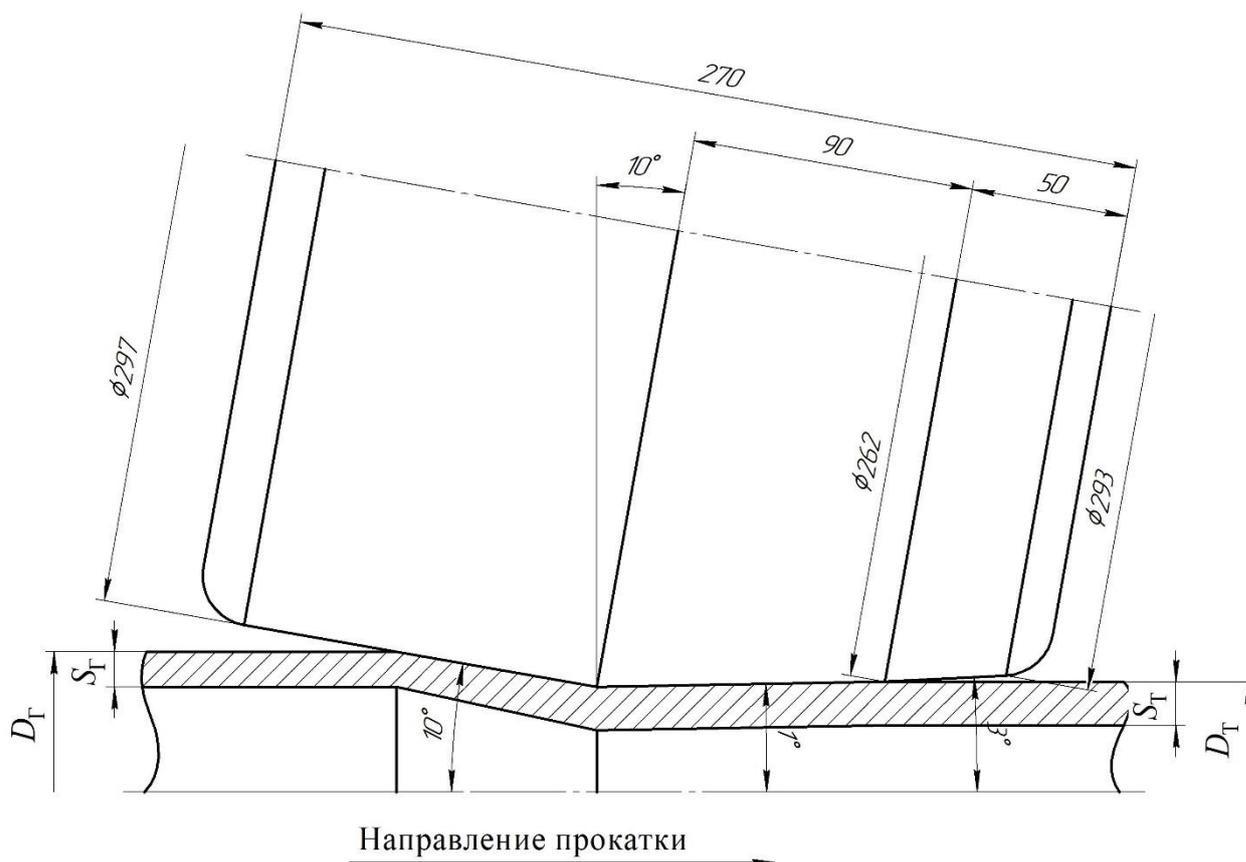


Рисунок 27 – Схема очага деформации стана МИСиС 130

Методика исследования на ТПА 160. Исследование процессов раскатки и калибрования с повышенными обжатиями на раскатном и калибровочном станах ТПА 160, проверка разработанных калибровок валков проводилась в режиме опытной прокатки. Разработана программа прокатки труб из стали марки 37Г2Ф диаметром 103 – 84 мм с толщиной стенки 12 – 24 мм.

Опытная прокатка труб по существующим режимам, но с применением валков с разработанной калибровкой осуществлялась согласно таблице прокатки ТПА-160.

Ниже приведены основные настроечные параметры раскатного и калибровочного станом ТПА-160.

Ниже представлены режимы прокатки на раскатном и калибровочном станом ТПА 160

Раскатной стан.

Калибровка рабочих валков	Рисунок 28
Схема прокатки (чашевидная) с углом раскатки, град	7
Диаметр калибра, мм	108, 101
Угол подачи, град	10

Калибровочный стан КС

Калибровка рабочих валков	Рисунок 29
Схема прокатки (чашевидная) с углом раскатки, град	7
Диаметр калибра, мм	103-84
Угол подачи, град	9,5

Толстостенные трубы диаметром 103-93 мм с толщиной стенки 23-18 мм получены из непрерывнолитой заготовки диаметром 145 мм. Сплошные заготовки прошивались в гильзы диаметром 135 мм со стенкой 29 и 24 мм.

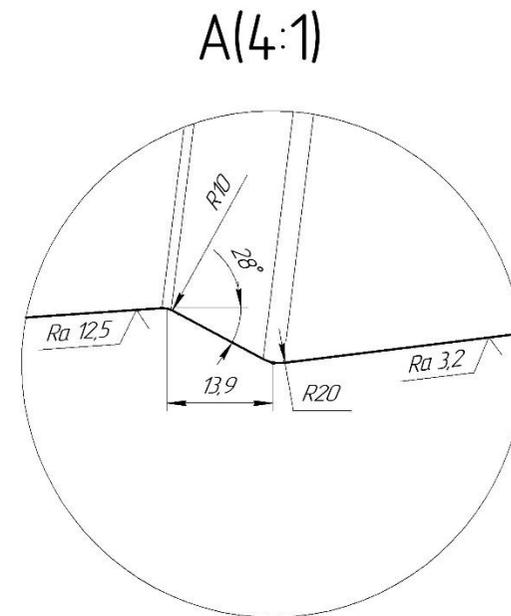
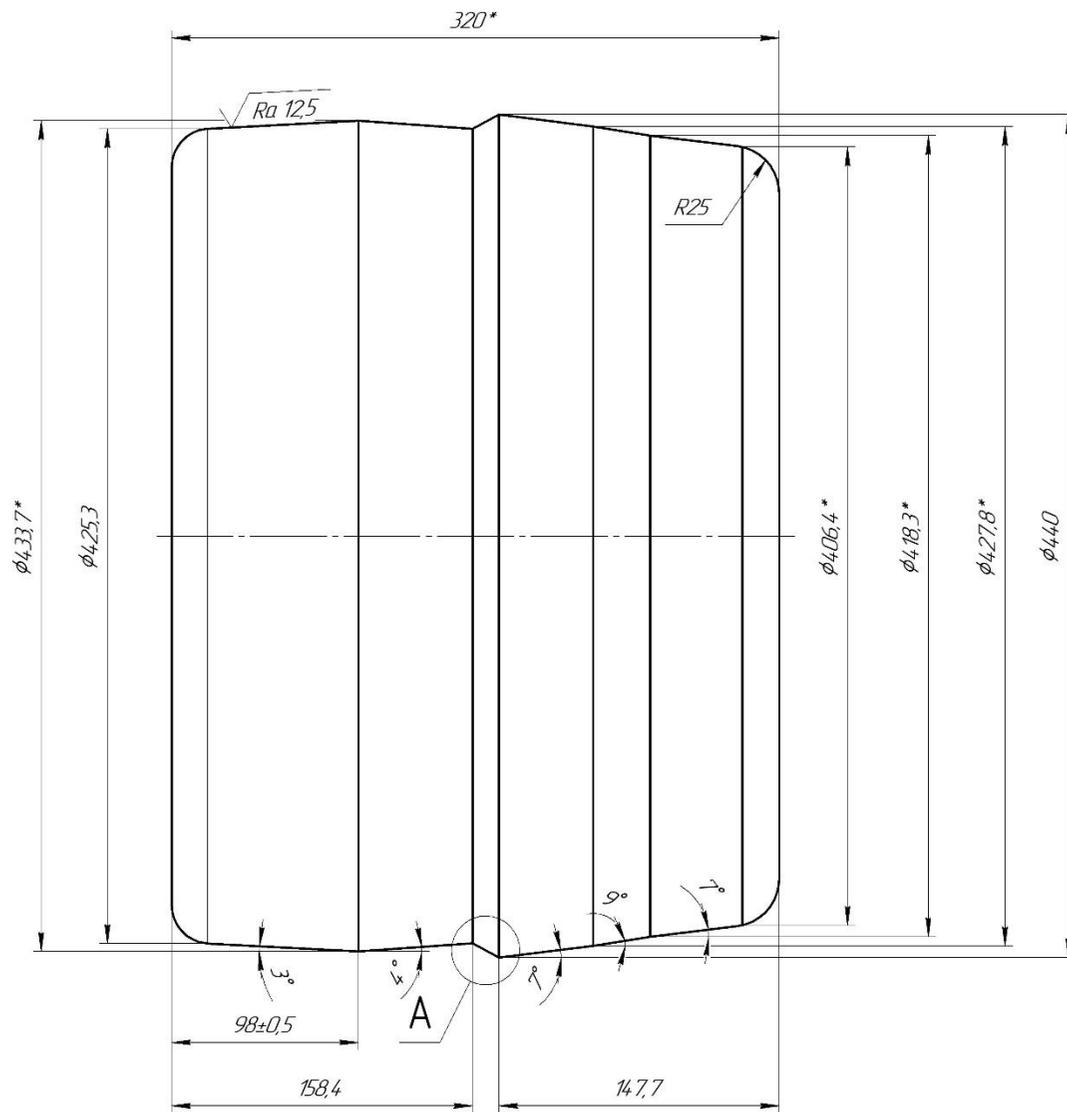
Раскатка черновых труб диаметром 110 мм с толщиной стенки 21 мм из гильз со стенкой 29 мм осуществлялась на оправке диаметром 66 мм с суммарным обжатием по диаметру 25 мм, т.е. без дополнительного обжатия по диаметру. В результате калибрования таких труб с обжатием по диаметру 7 – 17 % в калибровочном стане с углом подачи валков 9,5°, получены толстостенные трубы диаметром 103–91 мм с толщиной стенки 22-23 мм.

Раскатка черновых труб диаметром 103 мм с толщиной стенки 17 мм из гильз с толщиной стенки 24 мм, осуществлялась на оправке 66 мм с обжатием по диаметру 32 мм, т.е. с дополнительным обжатием на участке редуцирования валков. В результате калибрования таких труб с обжатием по диаметру

7 – 10 % в калибровочном стане, получены толстостенные трубы диаметром 96-93 мм со стенкой 18-19 мм. Параметры опытной прокатки труб представлены в таблице 14.

В процессе прокатки труб установлено, что калибрование (безоправочная прокатка) труб с обжатием более 17 % по диаметру ведет к образованию дефектов формы «гранение». Гранение образуется на чистовых трубах, прокатанных из черновых труб с соотношением $D/S=10$ имеющих повышенную кривизну, уширение заднего конца, что приводит к потере устойчивости процесса деформирования и повышения динамических нагрузок на трубу.

Процесс раскатки на оправке с повышенными обжатиями по диаметру осуществлялся стабильно, наличие оправки снижало динамические нагрузки и повышало устойчивость к образованию «гранения». Гранение труб на стадии раскатки не было выявлено. В связи с этим, повышение обжатия по диаметру рационально осуществлять в раскатном стане.



1 * Размеры для справок

Рисунок 28– Калибровка вала для раскатного стана

Таблица 14 – Параметры опытной прокатки

Раскатной стан									Калибровочный стан			
Черновая труба, мм			Диаметр калибра	Диаметр оправки	Угол подачи	Маш. время прокатки, с	Мощность двигателя (расчёт), кВт	Температура после РС (ср. знач)	Чистовая труба мм		Обжатие по диаметру	
Диаметр	Толщина стенки	Длина							Диаметр	Толщина стенки	мм	%
110	21	5700	108	66	10	14,5	941,4	912	103	22	7	6
110	21	5500	108	66	10	13,9	818,4	909	103	22	7	6
110	21	5600	108	66	10	13,9	772,0	944	98	22	12	11
110	21	5600	108	66	10	14	770,4	1090	96	22	14	13
110	21	5650	108	66	10	13,9	766,1	1043	98	22	12	11
110	21	5550	108	66	10	13,7	753,3	1100	91	23	19	17
103	17,8	6800	101	66	10	17,5	934,5	1121	93	19	10,5	10
103	18,1	6750	101	66	10	17,5	918,6	1126	96	19	7,2	7
103	17,6	6900	101	66	10	17,9	915,9	1121	96	18	7	7
103	17,8	6850	101	66	10	17,8	943,1	1122	96	18	7	7
103	17,6	6900	101	66	10	17,8	940,4	1120	95	18	8	8
103	17,8	6850	101	66	10	17,7	928,3	1121	95	19	8	7,5
103	18,0	6800	101	66	10	17,5	925,8	1124	95	19	8	7,5
110	17	6580	108	74	9	18,2	791,7	1122	100	18	10	9,5
110	17	6550	108	74	9	17,5	814,6	1111	97	18	13	12
110	17	6530	108	74	9	17,2	807,6	1119	96	19	14	13
110	17	6600	108	74	9	17,3	830,1	1112	98	18	12	11
110	17	6550	108	74	9	17,3	804,3	1117	100	18	10	9
110	17	6450	108	74	9	17,1	810,2	1107	99	18	11	10
110	10,7	6550	108	86	6	19,6	966,6	1121	103	11	7	6

4.2 Разработка калибровки валков раскатного и калибровочного станов ТПА 160

Применение новых режимов раскатки и калибровки с повышенными обжатиями по диаметру, а также проведение экспериментальной и опытно-промышленной прокатки в условиях ТПА 160, требует разработки калибровок рабочих валков. Основное требование ПНТЗ к разрабатываемым калибровкам заключается в том, что они должны обеспечивать стабильную работу раскатного и калибровочного станов при прокатке труб по существующей технологии и таблице прокатки. Разрабатываемые калибровки должны позволить эффективно осуществлять захват гильзы или черновой трубы, обеспечить необходимые режимы деформации при сохранении основных габаритных размеров валков.

С учетом указанных требований разработана калибровка рабочего валка для раскатного стана с возможностью осуществления процесса раскатки с повышенным обжатием гильзы по диаметру т.е. ее редуцирования.

На рисунке 30 представлена схема очага деформации раскатного стана, образованная валками с участком редуцирования.

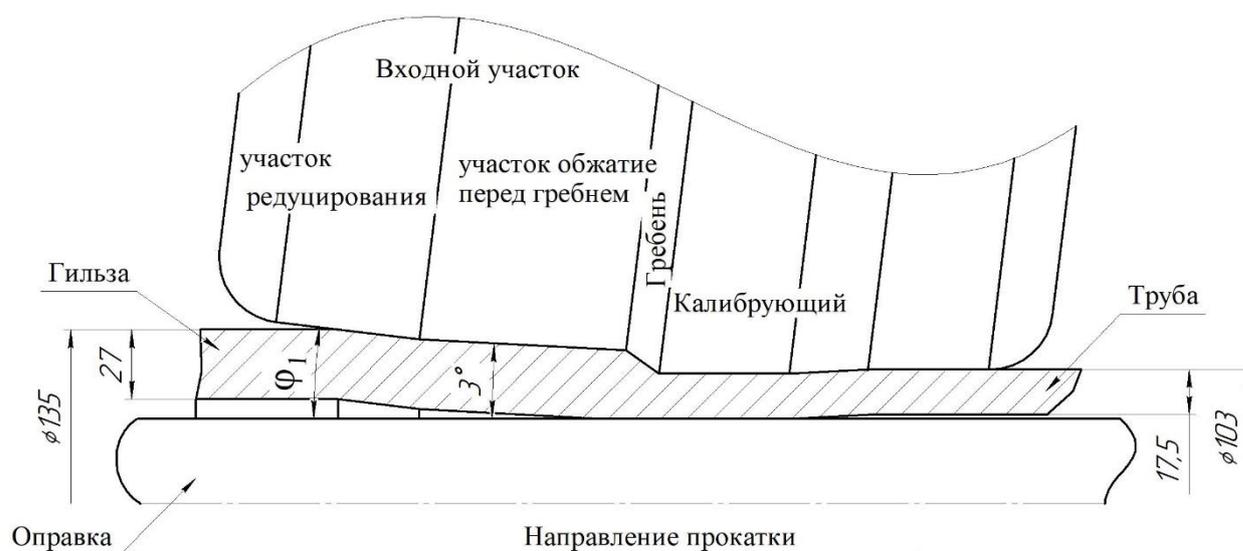


Рисунок 30 – Очаг деформации при раскатке с дополнительным обжатием

С целью увеличения обжатия гильзы по диаметру, входной участок рабочего валка (рисунок 30) выполнен с участком редуцирования и участком обжатия перед гребнем. Чтобы обеспечить габаритные размеры рабочего валка, из используемой калибровки на ТПА 160 исключены два участка: участок перед гребнем с углом наклона образующий к оси прокатки $2,5^\circ$ с длиной 20,5 мм; участок с углом наклона образующей к оси прокатки 1° длиной 22 мм, находящийся за участком с обратной конусностью и образующий с ним «яму». Исключение участка перед гребнем дает возможность минимального сокращения участка обжатия перед гребнем, который имеет угол наклона к оси прокатки 3° предназначенный для выполнения условия вторичного захвата и возможности осуществлять процесса раскатки по существующей технологии и таблицы прокатки.

На рисунке 31 представлена фотография рабочего валка с используемой калибровкой после перевалки клетки раскатного стана.



Рисунок 31 – Фотография валка раскатного стана с используемой калибровкой

Визуальный осмотр валков раскатного стана с используемой калибровкой показал, что участок с обратной конусностью и участок с углом наклона к оси прокатки 1° образующие «яму» являются нерабочими, что дает возможность их исключения. В связи с этим в место «ямы» предусмотрен участок с обратной конусностью, имеющей угол наклона образующей к оси прокатки 2° и обеспечивающий образование зазора между внутренней поверхностью черновой трубы и оправкой для дальнейшего извлечения оправки из трубы.

За счет исключения неработающих участков появилась возможность добавить редуцирующий участок протяженностью 98 мм. Участок редуцирования осуществляет захват гильзы и деформацию по диаметру или редуцирование. Угол наклона образующей дополнительного участка к оси прокатки – φ_1 с учетом условий захвата гильзы может варьироваться в пределах $5 \dots 15^\circ$, что обеспечивает стабильный захват гильзы и необходимые режимы обжатия по диаметру. По результатам экспериментальной и опытно-промышленной прокатки разработана калибровка (см рисунок 28) с участком редуцирования, имеющим угол φ равный 10° длиной 98 мм, который введен в штат калибровок валков раскатного стана ТПА 160.

Используемая калибровка валков на калибровочном стане ТПА 160 предназначена для обжатия труб по диаметру на 1-3 %. Валок имеет максимальный диаметр бочки 360 мм, длину 275 мм, устанавливается в стан по чашевидной схеме с углом раскатки 7° , ось поворота валка на угол подачи смещена относительно торца валка с входной стороны на 90 мм. Валок изготавливается из чугуна марки ТПХН-60, используемый для изготовления валков, применяемых в калибровочных станах и чистовых проходах. Валки образуют очаг деформации, состоящий из протяженного обжимного участка с углом наклона образующей к оси прокатки 1° , длиной 125 мм, короткого калибрующего участка длиной 30 мм, с образующей параллельной оси прокатки. Выходной участок с углом наклона образующей к оси трубы равным $2,5^\circ$.

Разрабатываемая калибровка должна обеспечить калибрование труб согласно существующей технологии и таблицы прокатки, с выдержкой габаритных размеров валка. Процесс калибрования труб с обжатием по диаметру 1-3 % следует осуществлять в валках с углом наклона образующей обжимного участка к оси прокатки не более 3° , что делает процесс более стабильным.

С целью увеличения обжатия черновой трубы по диаметру, необходимо предусмотреть участок редуцирования, позволяющий осуществлять обжатие более чем на 5 %. Чтобы осуществлять процесс редуцирования и калибрования, обжимной участок предложено выполнен составным из двух участков, первый осуществляет редуцирование – редуциционный участок, а второй калибрование – участок калибрования. В процессе калибрования с повышенным обжатием по диаметру, существенно меняются условия деформирования, поскольку с увеличением суммарного обжатия по диаметру увеличиваются величина частного обжатия и овальность трубы. Чтобы получить чистовую трубу с требуемыми допусками по диаметру, длину калибрующего участка необходимо увеличить, что позволит обеспечить калибрование труб, прокатываемых с повышенным обжатием по диаметру.

Длина калибрующего участка должна обеспечивать 2-3 цикла деформации, это позволит получить трубу без образования винтовой волны на ее поверхности. При прокатке труб диаметром 150 мм при редуцировании в валках, развернутых на угол подачи 12 градусов, длина калибрующего участка должна быть 60 мм – 70 мм.

На рисунке 32 представлена схема очага деформации в процессе калибрования с повышенным обжатием по диаметру.

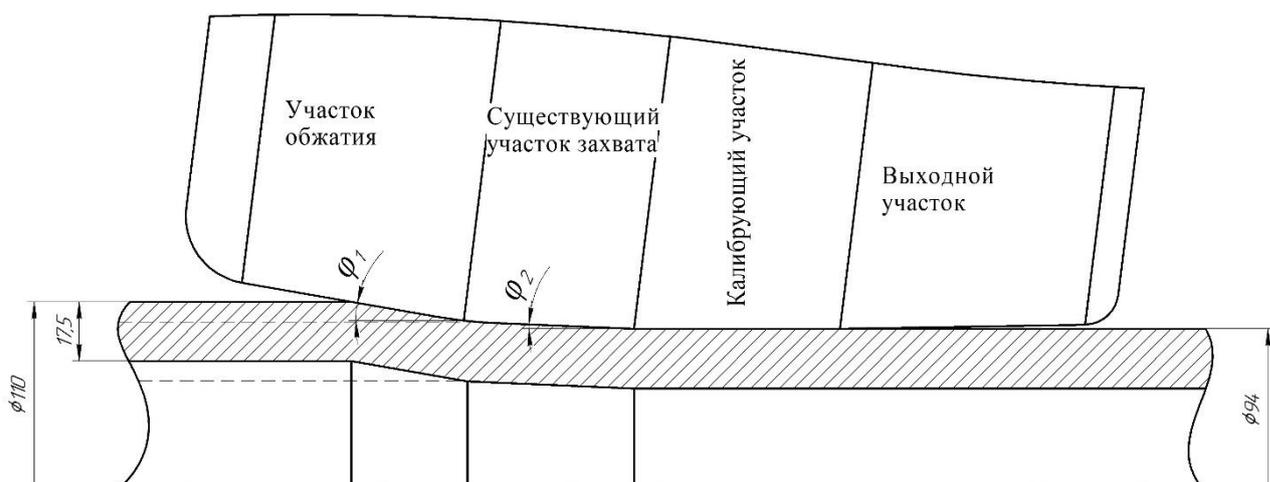


Рисунок 32 – Очаг деформации при калибровании и калибровании с дополнительным обжатием

Участок редуцирования длиной 85 мм, и углом наклона образующей к оси прокатки $\varphi_1=5-15^\circ$ обеспечивает условие захвата и позволяет повысить обжатие по диаметру более чем на 5 %. Существующий участок захвата с углом φ_2 равным $2^\circ-3^\circ$ длиной 50 мм, позволяет осуществлять калибрование всего существующего на ТПА – 160 размерного сортамента труб с величиной обжатия по диаметру 4 мм, что соответствует условию калибрования в валках с используемой калибровкой. Увеличение углов φ_2 до 3° позволяет сократить участок калибрования более чем в два раза, в связи с чем появляется возможность добавить участок редуцирования и увеличить калибрующий участок в два раза.

Для проведения опытной прокатки, разработана калибровка рабочих валков калибровочного стана, представленная на рисунке 29. Валок имеет участок редуцирования выполнен таким образом, что угол наклона образующей к оси прокатки - φ_1 составляет 10° , длина участка 85 мм; существующий участок захвата (второй участок редуцирования) выполненный с углом наклона образующей к оси прокатки - φ_2 равным $2,5^\circ$ длина участка 50 мм; калибрующий участок длиной 60 мм; выходной участок выполнен с углом φ равным 2° .

Всего за период опытной и опытно-промышленной прокатки на валках с новой калибровкой по штатной технологии было прокатано более 34000 тонн труб всех размеров. С увеличением обжатия по диаметру в раскатном и калибровочном станах прокатаны трубы диаметром 98–108 мм из заготовки 150-156 мм, а также диаметром 73 мм из заготовки диаметром 115 мм в количестве 135 т. качество труб удовлетворяет требованиям. Стойкость рабочих валков с новой калибровкой соответствует рабочим валкам с существующей калибровкой. Разработанные калибровки рабочих валков, позволяют осуществлять прокатку труб как по существующей технологии и таблицы прокатки, так и прокатку труб с увеличенным обжатием по диаметру. Валки с новыми калибровками введены в штат рабочих валков раскатного и калибровочного станов ТПА-160.

4.3 Формоизменение металла

Разработка режимов калибрования с повышенными обжатиями по диаметру требует проведения исследования формоизменения труб в очаге деформации трехвалкового раскатного стана в процессе прокатки труб без оправки. Чем больше отклонение от окружности поперечного сечения гильзы в очаге деформации (больше ее овальность) тем вероятнее потеря формы трубы (образование гранения). Исследование формоизменения осуществлялось на заторможенных гильзах. Редуцирование гильзы с $D/S=10$ осуществлялось на 16,5 %, а $D/S=7$ – на 25 %. Прокатанная часть гильзы с $D/S=10$, имеет диаметр 76 мм со средним значением толщины стенки 11,5 мм, $D/S=6,6$. При этом отношение D/S меняется на 34 %. Прокатанная часть гильзы с $D/S=7$, имеет диаметр 65,8 мм со средней толщиной стенки 16,4 мм, $D/S=4$. Изменение D/S составляет 43 %. Методика измерения геометрических размеров гильз (радиусов r_A и r_B) представлена выше в главе 2.

На рисунке 33 представлен график распределение коэффициента овальности заторможенных гильз по длине очага деформации. Коэффициент оваль-

ности определялся для четырнадцати поперечных сечений как отношение радиуса r_A к радиусу r_B недокатанной части гильзы в зонах контакта металла с валком.

На графике видно, что коэффициент овальности гильзы с $D/S=10$ изменяется более интенсивно, чем гильзы с $D/S=7$, поскольку при меньшем суммарном обжатии по диаметру, коэффициент овальности выше. За цикл деформации, среднее приращение коэффициента овальности на обжимном участке при прокатке гильзы с $D/S=10$, составляло 0,05, а при прокатке гильзы с $D/S=7$ – 0,04. При обжатии 16 % по диаметру, овальность гильзы с $D/S=10$ составляет 1,10, а гильзы с $D/S=7$ – 1,08.

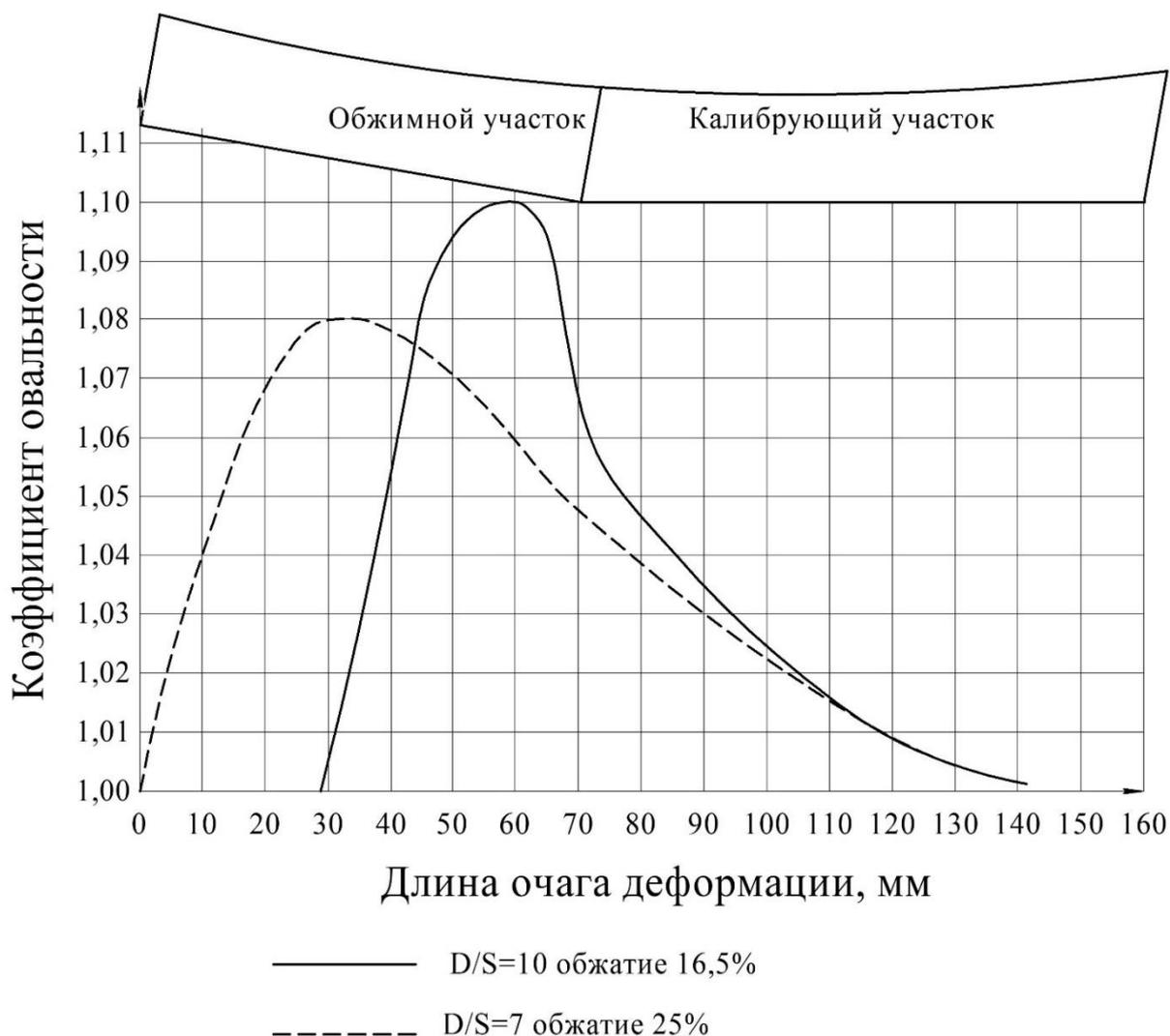


Рисунок 33 – Овальность гильз в очаге деформации при безоправочной прокатке труб на стане МИСиС 130 Т

При прокатке гильзы с $D/S=10$, обжатием по диаметру 16,5 %, коэффициент овальности увеличивается на всем обжимном участке, что характеризует низкую устойчивость поперечного профиля гильзы к смещению металла в межвалковое пространство. Процесс прокатки становится менее стабильным, в связи с чем, прокатка гильзы с $D/S=10$ с обжатием 25 % по диаметру оказалась неудачной. Для гильз с $D/S=10$ максимальное обжатие без учета внешних сил не может составлять более 15 %. В противном случае увеличивается овальность, снижается стабильность процесса, при воздействии внешних сил может образовываться граненость или смятие.

Поскольку, при безоправочной прокатке, толщина стенки увеличивается, то отношение D/S трубы уменьшается, что делает процесс прокатки стабильнее. На рисунке 34 показаны графики изменения D/S раската по длине очага деформации, полученные при измерении заторможенных гильз. Поскольку отношение D/S гильзы по длине очага деформации при редуцировании уменьшается, сечение с максимальным значением овальности смещается с начала калибрующего участка, на входной участок с меньшим значением отношения D/S гильзы. При этом, максимальное значение коэффициента овальности существенно ниже, чем при раскатке труб на оправке [71]. Раскатка труб на оправке сопровождается большей овальностью на калибрующем участке, поскольку отношение D/S гильзы больше, чем на обжимном.

Характерные особенности распределения овальности по длине очага деформации процесса безоправочной прокатки или редуцирования:

- максимальное значение коэффициента овальности зависит от D/S гильзы и наблюдается на обжимном участке очага деформации;
- максимальное обжатие тонкостенных гильз с $D/S=10$ по диаметру без учета внешних сил не может составлять более 15 %, так как происходит потеря устойчивости и снижение стабильности процесса прокатки, что приводит к образованию гранения;
- овальность гильзы при редуцировании ниже, чем при прокатке на оправке.

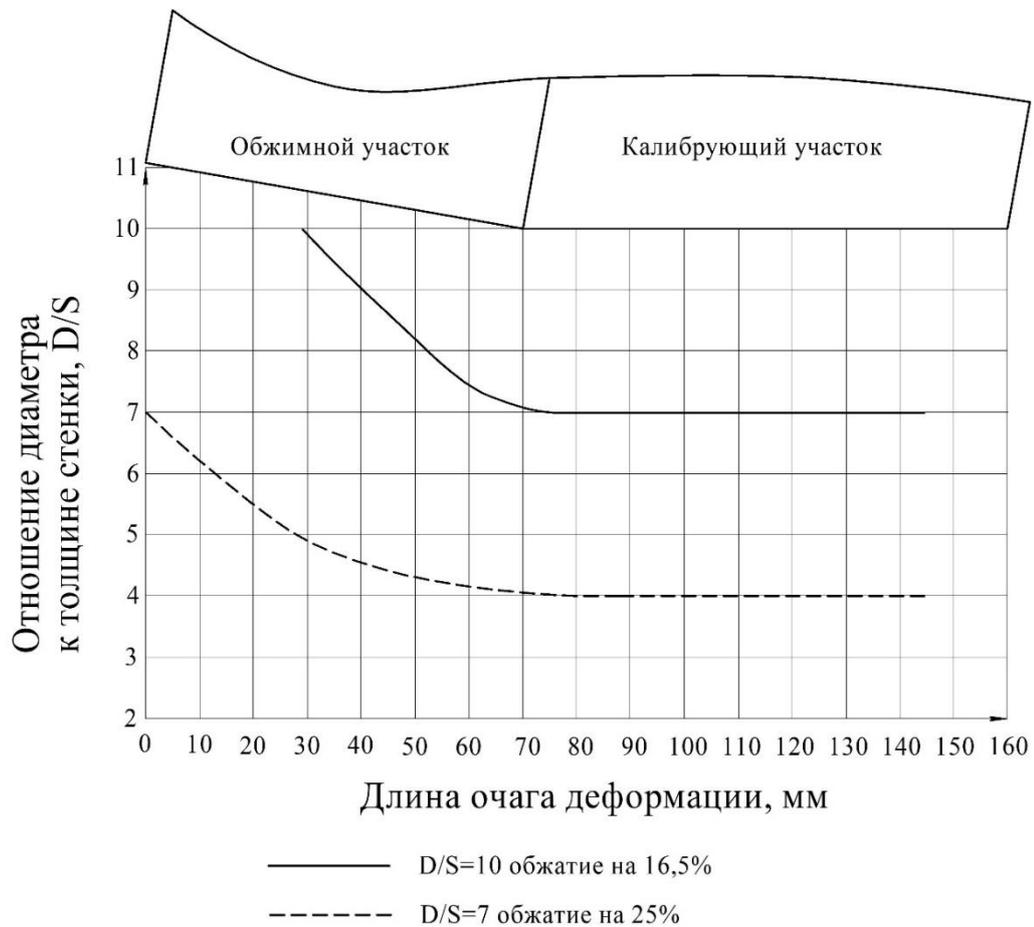
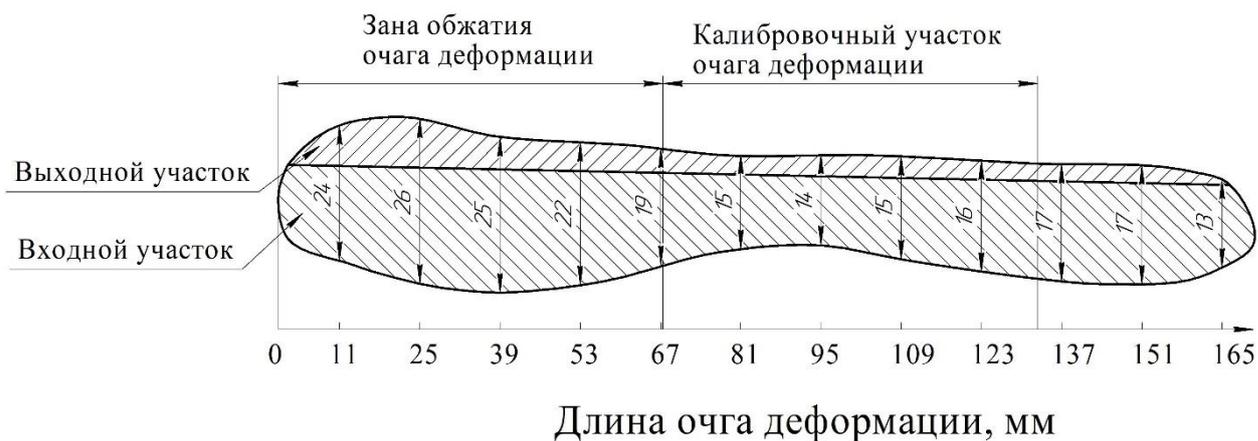


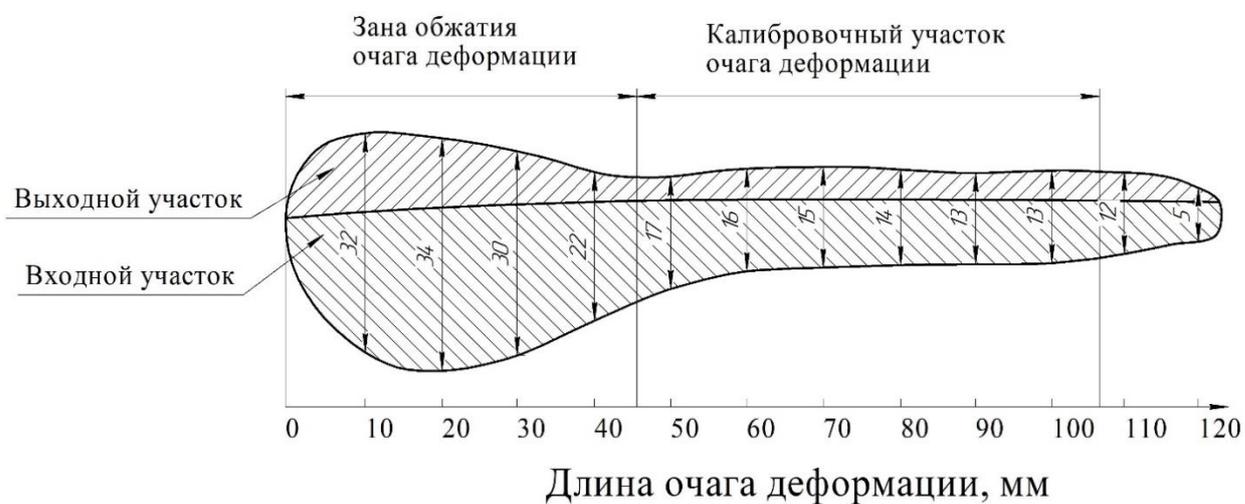
Рисунок 34 – Распределение отношения D/S гильзы по длине очага деформации при безправочной прокатке гильз на стане МИСиС 130Т

Овальность гильзы в очаге деформации влияет на ширину и площадь контактной поверхности [8]. По заторможенным в процессе редуцирования гильзам получены отпечатки контактной поверхности представление на рисунке 35.

Пятно контактной поверхности при безправочной прокатки можно разделить на входной участок, который соответствует участку редуцирования и выходной участок. Сплошная линия, отмеченная на пятнах контактной поверхности, разделяющая оба участка является геометрическим местоположением точек B каждого поперечного сечения очага деформации, которые лежат на кратчайшем расстоянии от оси прокатки до валка.



а



б

Рисунок 35 – Отпечаток площади контактной поверхности металла с валком в процессе безоправочной прокатки гильз с а – $D/S=7$ и б – $D/S=10$

В результате увеличения овальности в зоне обжатия очага деформации наблюдается увеличение ширины контактной поверхности. Безоправочная прокатка гильзы с $D/S=7$ сопровождалась увеличением ширины контактной поверхности до 26 мм, на расстоянии 25 мм от начала очага деформации на обжимном участке. При обжатии гильзы с $D/S = 10$, максимальная ширина контактной поверхности составляет 34 мм. Наибольшего значения ширина достигает на расстоянии 20 мм от начала очага деформации на обжимном участке.

На калибрующем участке очага деформации, ширина контактной поверхности уменьшается и составляет 13-16 мм. Ширина контактной поверхности для гильзы с $D/S=7$ и $D/S=10$ близкие.

Среднее значение площади контактной поверхности для заторможенных гильз с исходным значением $D/S=7$ составляет 2580 мм^2 , на входном участке – 2007 мм^2 , на выходном – 573 мм^2 . Отношения площади контактной поверхности на выходном участке к площади контактной поверхности на входном участке составляет 0,28. Среднее значение площади контактной поверхности для гильзы с $D/S=10$ составляет 2260 мм^2 , на входном участке – 1350 мм^2 , на выходном – 910 мм^2 . Отношение площади контактной поверхности на выходном участке к площади на входном составляет 0,68. Отношение площадей для тонкостенной гильзы больше чем для толстостенной, это обусловлено увеличением ширины контактной поверхности на входном и выходном участке за счёт увеличения овальности гильз. Поскольку овальность гильзы с исходным значением $D/S=10$ выше, то ширина контактной поверхности на входном и выходном участках увеличивается за счет овальности гораздо сильнее, чем при прокатке гильз с исходным значением $D/S=7$.

Формоизменение процесса раскатки с большими обжатиями по диаметру исследовались на заторможенных гильзах, полученных при раскатке на оправке в условиях раскатного стана ТПА 160. Раскатка труб осуществлялась в валках с разработанной калибровкой (см. рисунки 28). Размеченный образец представлен на рисунке 36.



Рисунок 36 – Заторможенный образец, полученный при раскатке на оправке в раскатном стане ТПА 160

На рисунке 37 представлена схема пятна контактной поверхности металла с валками.

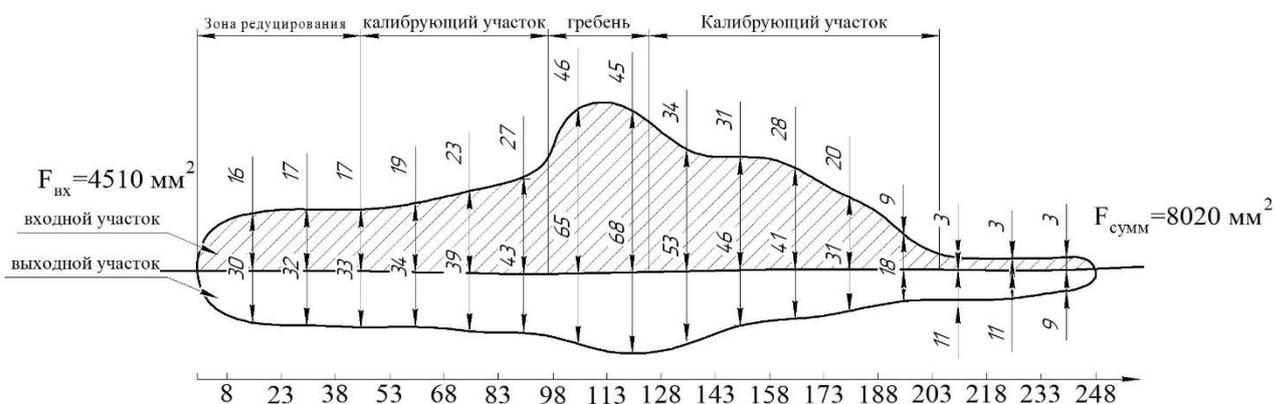


Рисунок 37 – Пятно контактной поверхности заторможенного образца с валком

Штриховкой обозначена входная часть пятна контактной поверхности, где осуществляется основная деформация гильзы валками. Согласно схеме рисунка 18 в поперечном сечении входной части можно выделить две зоны *АС* – зона редуцирования и *СВ* – зона обжатия. Эта часть пятна контактной поверхности учитывается при расчете усилия металла на валок. Не заштрихованная

часть соответствует участку ВС' (см схему рис. 18), который образуется в момент торможения стана.

Увеличение ширины контактной поверхности наблюдается на участке обжатия стенки перед гребнем в зоне обжатия стенки гильзы и на гребне. Ширина контактной поверхности заштрихованного участка, соответствующая зоне редуцирования, достигает 17 мм. На участке обжатия стенки гильзы перед гребнем, ширина заштрихованной части контактной поверхности увеличивается до 27 мм. Наибольшее значение ширины заштрихованной части наблюдается на гребне, где осуществляется деформация по стенке и достигает максимального значения 46 мм. Ширина контактной поверхности по всей длине калибрующего участка меняется от 34 мм до 9 мм. При раскатке на оправке, ширина контактной поверхности изменяется более интенсивно, поскольку в зоне обжатия гильзы по стенке, овальность увеличивается гораздо интенсивнее чем при безоправочной прокатке.

На рисунке 38 представлен график изменения овальности раската по длине очага деформации. Согласно графику рисунка 38, в очаге деформации трехвалкового раскатного стана ТПА-160 с разработанной калибровкой (рисунок 28), наблюдается типичное для процесса раскатки распределение овальности, которое соответствует результатам компьютерного моделирования и теоретическим исследованиям. Максимальное значение, овальность 1,135 достигается в начале калибрующего участка очага деформации, непосредственно перед гребнем на расстоянии, соответствующем величине $1/3$ шага подачи.

Наличие деформации по стенке, приводит к более интенсивному увеличению ширины пятен контактной поверхности, и овальности гильзы, в отличие от процесса безоправочной прокатки. Раскатка с повышенным обжатием по диаметру способствует увеличению овальности, как следствие, росту площади контактной поверхности зоны редуцирования. Оправка позволяет осуществлять процесс деформирования стабильнее и дает возможность увеличить суммарное обжатие по диаметру без риска потери формы трубы (образования гранения). Это дает возможность вести процесс раскатки с повышенным

обжатием по диаметру, при этом, снизить суммарное обжатие при безоправочной прокатки до 17 % и получить трубу меньшего диаметра, не используя редуционный стан продольной прокатки.

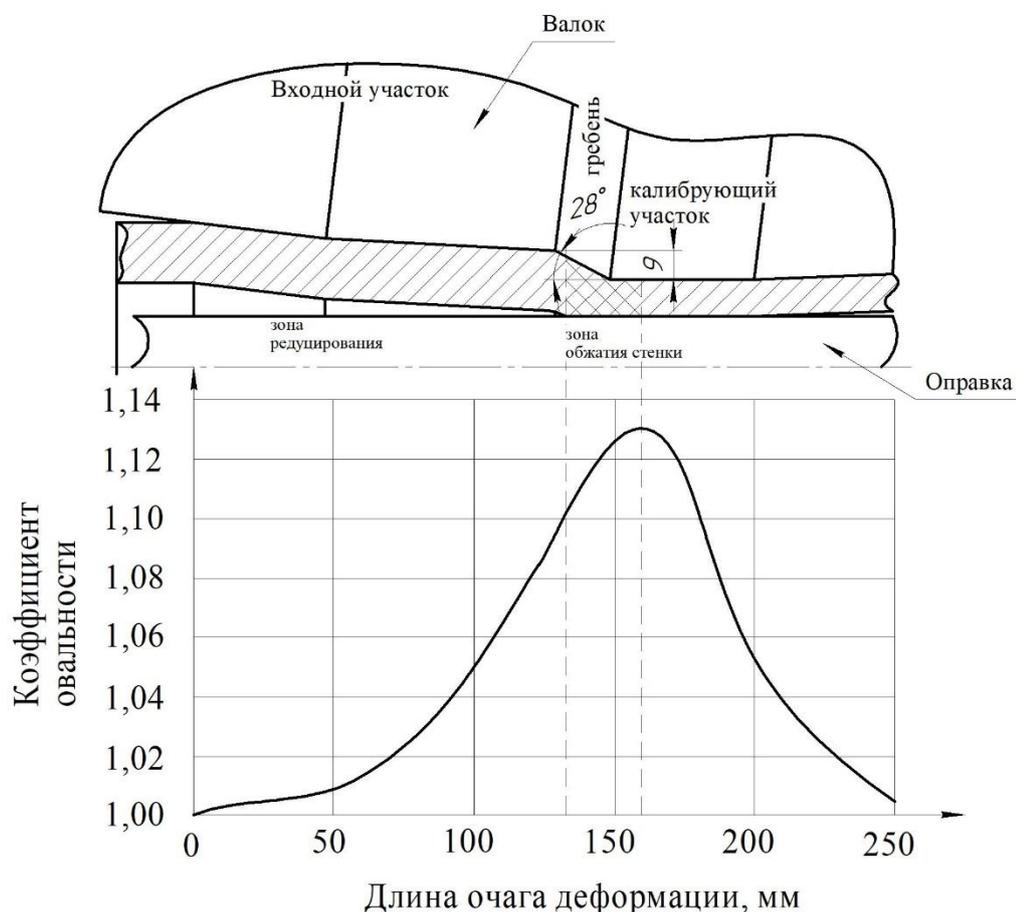


Рисунок 38 – Овальность труб в очаге деформации при раскатке на оправке в трехвалковом стане ТПА 160

При максимальном значении овальности, для условия раскатки труб на раскатном стане ТПА 160, параметр m составляет 0,033. При рассмотренных условиях раскатки параметр m следует выбирать в диапазоне (0,025...0,034).

По длине очага деформации, изменение овальности можно определить при помощи коэффициента a . Коэффициент a для заторможенных гильз в поперечных сечениях определяется согласно отношению овальности в рассматриваемом сечении к максимальной овальности гильзы, которая соответствует калибрующему участку:

$$a = \frac{\xi_i}{\xi_{max}} \quad (29)$$

ξ_{max} – максимальное значение овальности;

ξ_i – значение овальности в рассматриваемом сечении

На участке редуцирования, a меняется до 0,88...0,89, на участке обжатия перед гребнем, овальность гильзы увеличивается интенсивнее, a увеличивается до 0,90...0,95. В конце калибрующего участка, овальность раскатка снижается, a составляет 0,95. Данные значения коэффициентов можно использовать при расчете коэффициента овальности в условиях раскатного стана ТПА 160.

4.4 Исследование геометрических размеров труб

Исследование геометрических размеров, в частности, диаметра и толщины стенки позволяет оценить качество получаемых труб, а именно отклонение геометрических размеров от номинальных значений. Исследование точности труб по диаметру, толщине стенки, изменения геометрических размеров и разностенности осуществлялось на трубах полученных экспериментальной безправочной прокаткой на стане МИСиС 130, а также труб, полученных при проведении опытной прокатки на ТПА 160.

Точность по толщине стенки. Для исследования изменения разностенности в процессе безправочной прокатки гильз, был осуществлен эксперимент, а также разработана компьютерная модель процесса. Исследование изменения разностенности труб в поперечном сечении (поперечной разностенности) осуществлялось на трехвалковом стане МИСиС 130.

В таблице 15 представлены результаты замеров труб после редуцирования, а также разностенность гильз и полученных после редуцирования труб. Отношение диаметра к толщине стенки гильзы – D/S ; отношение диаметра к толщине стенки трубы – D_T/S_T ; средний диаметр трубы – D_T ; средняя толщина

стенки трубы – S_T ; разностенность – ΔS_T . Значение разностенности исходных гильз – ΔS_T представлены в таблице 13.

Таблица 15 – Размеры труб

D/S	Обжатие по диаметру на							
	5 %				25 %			
	D_T/S_T	D_T мм	S_T мм	ΔS_T %	D_T/S_T	D_T мм	S_T мм	ΔS_T %
5	5,0	84,9	17,1	7,2	3,4	66,6	19,6	6,2
7	6,3	83,8	13,2	9,1	3,8	65,1	17,0	6,5
10	8,8	84,1	9,6	13,5	6,0	67,8	11,5	11,4

Из таблиц видно, что в процессе редуцирования, разностенность труб снижается. При обжатии гильзы с $D/S=5$ на 5 %, она снижается в 1,3 раза, а при обжатии на 25 % – в 1,5 раза. Аналогичная картина происходит при обжатии гильзы с $D/S=10$. В результате обжатия на 5 % разностенность уменьшилась в 1,5 раза, а в результате обжатия на 25 % – 1,8 раза. В связи с уменьшением диаметра и увеличением толщины стенки гильз в процессе редуцирования, отношение D/S полученных труб становится меньше. При обжатии по диаметру 25 %, отношение D/S гильз меняется в 1,5 – 1,6 раза.

Основываясь на результатах проведенного эксперимента, была разработана компьютерная модель, описывающая течение процесса деформации труб при безоправочной прокатки в трёхвалковом стане, предназначенная для исследования изменения точности труб по толщине стенки. В качестве среды моделирования процесса, выбран программный комплекс DEFORM. Моделирование процесса редуцирования труб осуществлялось в условиях аналогичных проведенному эксперименту на стане МИСиС 130 с обжатием по диаметру на 25 %.

Разностенность гильз задавалась при их построении путём смещения центра внутреннего диаметра относительно центра внешнего на величину e которую можно определить по формуле:

$$e = \frac{S_r^{\max} - S_r^{\min}}{2} \quad (30)$$

Согласно формуле (30), гильза диаметром 86,5 мм с разностенностью 10,7 % имеет величину e равную 0,7 мм. Результаты замеров образца, полученного из гильзы с $D/S=7$ путем моделирования, и их сравнение с замерами образца, полученного на стане представлены в таблице 3. Трубы, полученные моделированием, имеют расхождение по диаметру 5 % с трубами полученными прокатанными на стане. Это соответствует уровню точности прошитых гильз. Расхождение по толщине стенки составляет 11,7 %, что чуть выше разностенности исходной гильзы, которая составляет 9,1 % см. таблицу 16. Расхождение в значении разностенности труб, полученных экспериментально и с помощью моделирования, составляет 3 % что указывает на возможность использование разработанной модели для исследования точности труб по толщине стенки в процессе редуцирования. Для исследования изменения разностенности в процессе безправочной прокатки на трехвалковом стане, осуществлено моделирование процесса редуцирования труб из гильз с $D/S=7$ имеющих различную исходную разностенность. В таблице 17 представлены параметры гильз и полученных после редуцирования труб. Заданы следующие значения разностенности для гильз: 0 % – гильза с нулевой разностенностью; 10,7 % – гильза, соответствующая экспериментальным данным с величиной задаваемого эксцентриситета $e=0,7$ мм; 19,8 %, 21,4 % – гильзы с повышенным значением разностенности, задаваемая величиной $e = 1,3$ мм, 1,4 мм соответственно.

Таблица 16 – Параметры труб

Образец полу- ченный	Параметры труб					
	D_T/S_T	D_T	S_T , мм	S_T^{\max} мм	S_T^{\min} мм	ΔS_T %
эксперимен- тально	3,8	65,1	17,0	17,5	16,4	6,5
моделирование	4,5	68,3	15,0	15,5	14,5	6,7
Разница, %	21,0	5,0	11,7	11,7	11,7	3,0

Полученные в результате моделирования трубы, замерялись и определялась их точность. На гистограмме рисунка 39 показана общая динамика изменения разностенности гильз.

Редуцирование гильзы с нулевой разностенностью в трехвалковых станках винтовой прокатки приводит к снижению точности трубы по толщине стенки. Так, в модельном эксперименте, разностенность гильзы увеличилась до 5,4 %. Однако, редуцирование гильз с заданной разностенностью 10,7; 19,8; 21,4 % существенно снижает ее. Разностенность гильз с исходными значениями 10,7; 19,8; 21,4 % уменьшается в 1,2 – 1,7 раза, что соответствует результатам эксперимента представленные в таблицах 15, 16. В целом, разностенность стремится к определённому минимальному значению, которое получается в процессе редуцирования «идеальных» гильз, в данном эксперименте это значение составляет 5,4 %.

Таблица 17 – Параметры гильз и труб при обжатии 25 %

e, мм	Параметры гильз				Параметры труб			
	S _Г мм	S _{max} мм	S _{min} мм	ΔS _Г %	S _Т мм	S _{max} мм	S _{min} мм	ΔS _Т %
0,0	13,0	0,0	0,0	0,0	14,7	15,1	14,3	5,4
0,7	13,0	13,7	12,3	10,7	14,3	14,9	14,0	6,3
1,3	13,0	14,3	11,7	19,8	14,5	15,7	13,3	16,5
1,4	13,0	14,4	11,6	21,4	14,2	15,7	13,2	17,6

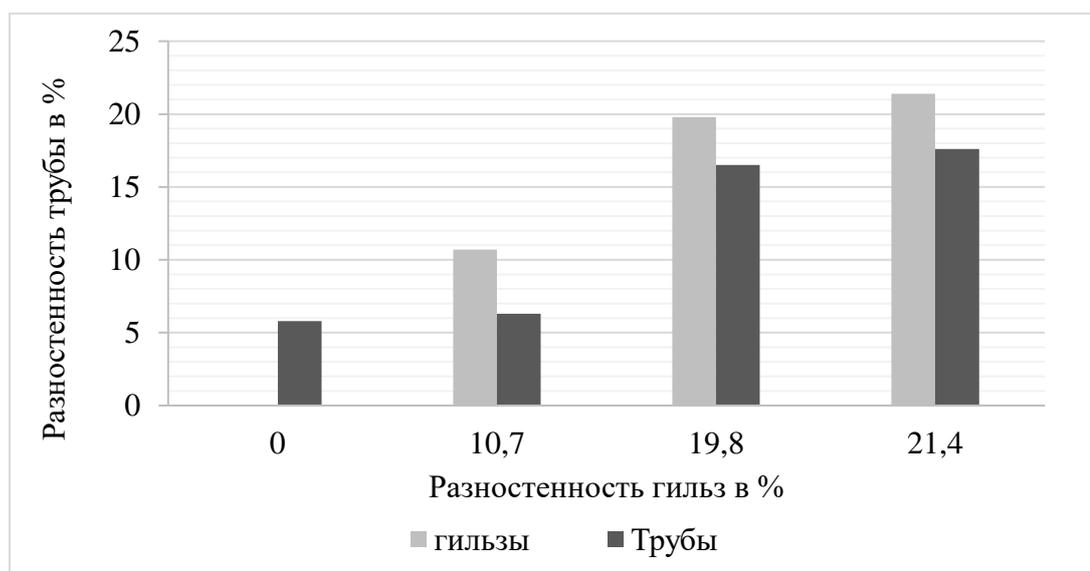


Рисунок 39 – Разностенность исходных гильзы и трубы полученных после моделирования процесса редуцирования

Изменение разностенности обусловлено наличием тангенциальных составляющих деформаций, а также неравномерностью интенсивности деформации в поперечном сечении трубы. На рисунке 40 показано распределение интенсивности деформации - ϵ в поперечном сечении, на обжимном участке

очага деформации. Эпюры получены при моделировании процесса редуцирования гильзы с нулевой разностенностью а), и с максимальным значением разностенности 21,4 %. б).

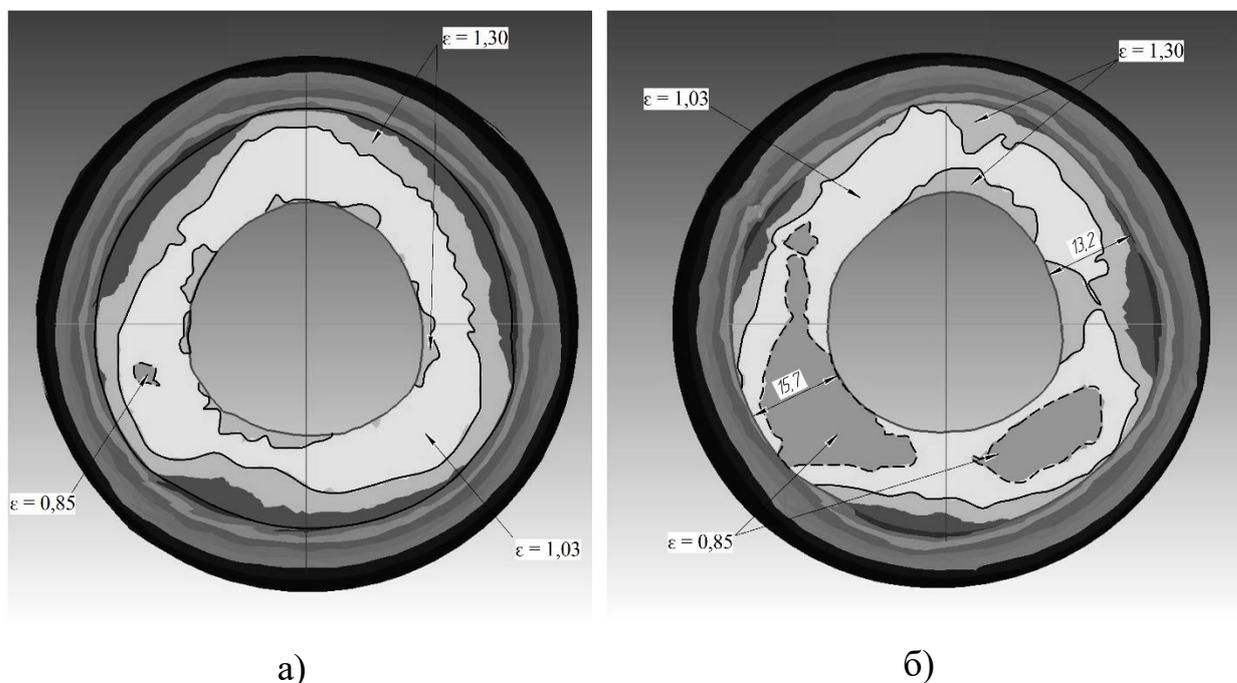


Рисунок 40 – Интенсивность деформации при редуцировании гильз с нулевой разностенностью а) и с разностенностью 21,4 % б)

Для гильзы с исходной разностенностью 21,4 % указаны участки с максимальной 15,7 мм, и минимальной 13,2 мм толщиной стенки. Зоны с наиболее интенсивной деформацией $\epsilon=1,30$ располагаются на поверхности раската, под рабочими валками, а также на его внутренней поверхности. При редуцировании гильзы с нулевой исходной разностенностью, зона с минимальной интенсивностью деформации $\epsilon=0,85$; $\epsilon=1,03$ наблюдается в зазорах между валками, где толщина стенки на 0,4 мм больше, чем под валком что приводит к появлению разностенности идеальной гильзы после редуцирования.

При редуцировании гильзы с исходной разностенностью 21,4 %, зона с наименьшим значением интенсивности деформации $\epsilon=0,85$, наблюдается на

участке с большей толщиной стенки 15,7 мм (на рисунок 3 б) обозначено пунктирной линией), а на участке с меньшей толщиной стенки 13,2 мм располагается зоны с максимальной интенсивностью деформацией $\epsilon=1,30$. На участке с большей толщиной стенки интенсивность деформации ниже, как следствие, толщина стенки увеличивается меньше, в данном случае на 1,2 мм, а на участке с меньшим значением исходной толщины стенки интенсивность деформации выше, в виду этого толщина стенки увеличивается на 1,5 мм, что на 25 % больше. Разница между максимальным и минимальным значением толщины стенки гильзы с разностенностью 21,4 % до редуцирования составляла 2,8 мм, а после редуцирования 2,5, что привело к снижению разностенности.

Как и в процессе винтовой раскатки труб на оправке, так и при безоправочной винтовой прокатки, разностенность труб снижается. Винтовая прокатка в рассмотренных режимах деформирования оказывает положительное влияние на точность труб по толщине стенки в поперечном сечении.

4.5 Изменение толщины стенки

Изменение толщины стенки на участке редуцирования, или при безоправочной прокатки является не менее важным фактором. В процессе раскатки труб с повышенным обжатием по диаметру, на участке редуцирования толщина стенки гильзы – увеличивается, что приводит к увеличению суммарного обжатия по стенке и зоны редуцирования. Толщина стенки черновой трубы зависит от изменения толщины стенки при безоправочной прокатки, следовательно, в процессе калибрования с повышенными обжатиями следует определять конечное значение толщины стенки при расчете режимов деформирования и таблицы прокатки.

Согласно результатам компьютерного моделирования, представленные в главе 3, при безоправочной прокатки существенное влияние оказывают такие факторы, как отношение диаметра к толщине стенки исходной гильзы – D/S , суммарное обжатие по диаметру – ϵ_d , угол наклона образующей обжим-

ного участка валка к оси прокатки - φ . Однако, при проведении экспериментальной прокатки калибровка рабочих валков не менялась. Угол φ составлял 10° .

При экспериментальной безоправочной прокатки исследованы два фактора: D/S гильзы с минимальным – 5 и максимальным – 10 значениями; ε_d с минимальным – 5 %, максимальным – 25 %, значениями.

На рисунке 41 представлены графики изменения толщины стенки в зависимости от рассмотренных факторов. Во всех случаях толщина стенки увеличивается, что соответствует [21-28]. При прокатке гильз с D/S равным 5 с обжатием 5 %, толщина стенки увеличивается незначительно, изменение толщины стенки составляет 2,3 %. С увеличением обжатия до 25 % толщина стенки увеличилась на 15,2 %. При увеличении D/S и обжатия по диаметру, толщина стенки увеличивается более интенсивно.

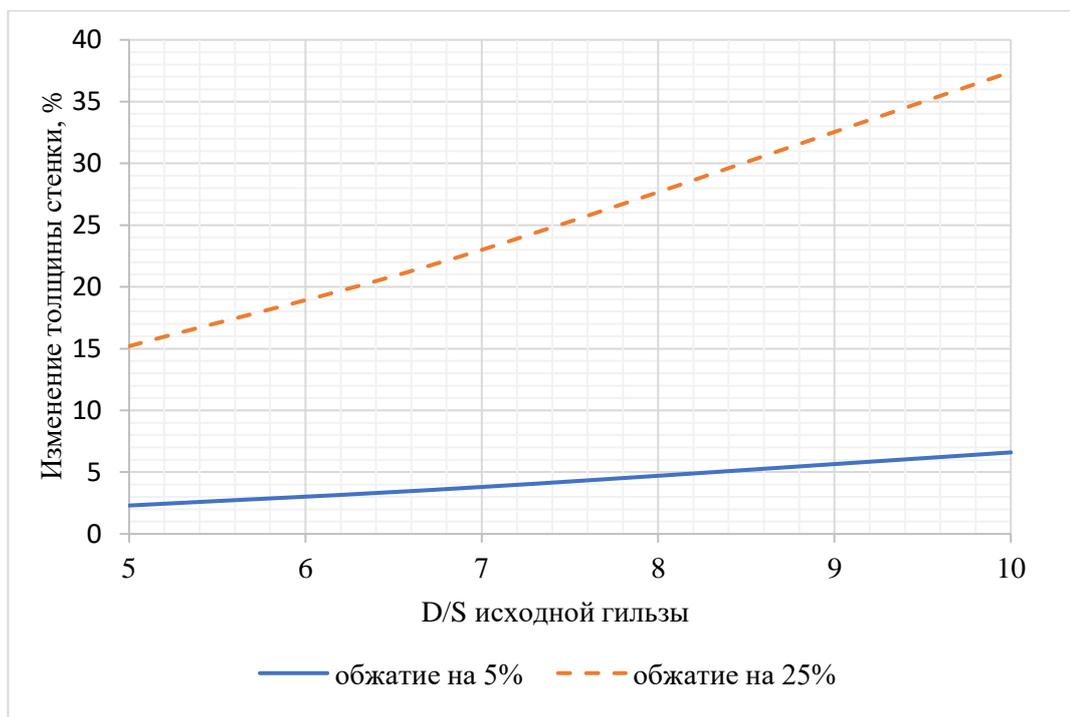


Рисунок 41 – Изменение толщины стенки

В результате анализа факторного эксперимента, получено уравнение регрессии (31). Оба фактора является значимыми, а уравнение регрессии – адекватное в рассмотренных интервалах варьирования. Анализ уравнения подтверждает результаты компьютерного моделирования, и указывает на существенность влияния двух основных факторов (суммарное обжатие и D/S гильзы) на изменение толщины стенки.

$$\varepsilon_s = 13,1 + \left(\frac{\varepsilon_d - 15}{10}\right) \cdot 7,5 + \left(\frac{\frac{D}{S} - 7,5}{2,5}\right) \cdot 3,5 \quad (31)$$

Уравнение регрессии показывает взаимосвязь между отношением D/S гильзы, ее обжатие по диаметру и изменение толщины стенки, применительно к условиям эксперимента.

Согласно теоретическим исследованиям, представленным в главе 2, угол τ определяемой по формуле (17) имеет прямо пропорциональную зависимость от D/S и обжатия по диаметру. В общем случае, определить изменение толщины стенки можно согласно уравнению (16), однако, необходимо определить изменение угла τ на обжимном участке очага деформации.

На рисунке 42 представлены графики изменения угла τ рассчитанного по формуле (17) для экспериментальной прокатки.

Согласно графику рисунка 42 при увеличении D/S гильзы и суммарного обжатия по диаметру, угол τ увеличивается, следовательно, интенсивность изменения толщины стенки – увеличивается. Действительно, при обжатии на 25 % толщина стенки увеличивается более интенсивно, причем, чем меньше исходная толщина стенки гильзы, тем более интенсивно осуществляется ее увеличение. Опытным путем установлено, что угол τ характеризует интенсивность изменения толщины стенки гильзы при безоправочной прокатки.

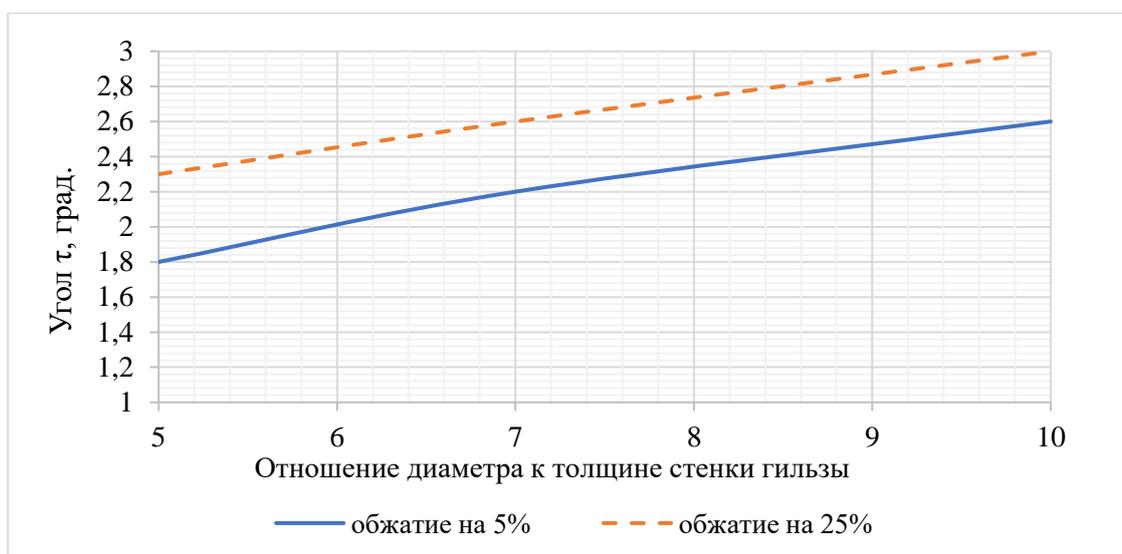


Рисунок 42 – Интенсивность изменения толщины стенки при безоправочной прокатке труб на стане МИСиС 130 Т

Компьютерное моделирование процесса безоправочной прокатки (см. главу 3) симулирующее экспериментальную прокатку, было проведено с целью проверки теоретического исследования изменения толщины стенки согласно уравнению (16) и экспериментальной зависимости (31). Серия результатов моделирования, показывает, что толщина стенки в рассмотренных условиях, как и при экспериментальной прокатке, увеличивается. На рисунке 43 представлена трехмерная компьютерная модель заторможенной гильзы с $D/S=7$ при обжатии по диаметру на 25 %. При измерении углов φ и τ установлено, что среднее значение угла φ составляет $9,7^\circ$, а среднее значение угла $\tau=2,55^\circ$ что соответствует экспериментальным данным (см. рис. 42). Конечная толщина стенки образца, полученного компьютерным моделированием, составляет 15,7 мм., изменение толщины стенки составляет 2,7 мм, что соответствует рассчитанному по формуле (16) значению изменения толщины стенки.

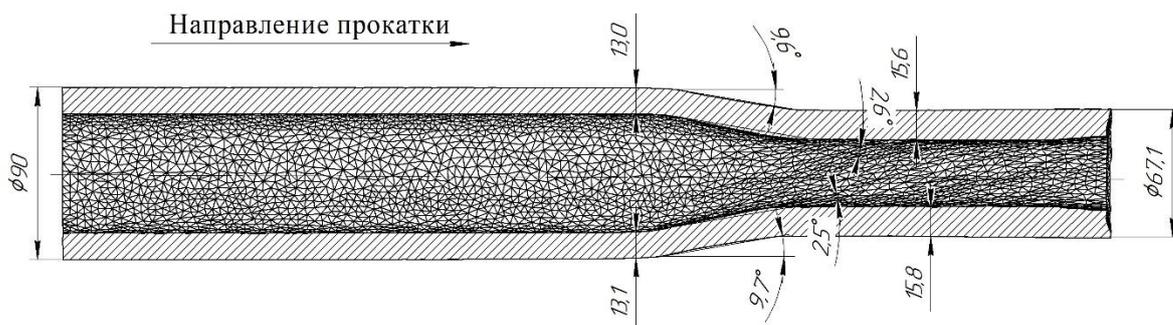


Рисунок 43 – Образец, полученный при компьютерном моделировании в DEFORM

Результаты параметров изменения толщины стенки компьютерного моделирования, соответствуют результатам, полученным в процессе редуцирования на стане МИСиС 130. Полученные в результате теоретического исследования зависимости (16) и (17) и уравнение регрессии (31) позволяют оценить изменение толщины стенки гильзы при безоправочной прокатке или в зоне редуцирования в процессе раскатки с большими обжатиями по диаметру.

При анализе изменения толщины стенки на калибровочном стане ТПА 160 были выбраны трубы, полученные при калибровании с обжатием по диаметру 11; 13 и 17 %. В таблице 18 представлены размеры черновых труб и труб, полученных после редуцирования, а также рассчитанные значения приведенных углов $\varphi_{п}$ и $\tau_{п}$. С увеличением обжатия по диаметру значение угол $\tau_{п}$ – увеличивается, а значит интенсивность изменения толщины стенки становится выше. Так, при обжатии на 11 %, $\tau_{п} = 1,4^{\circ}$, при этом толщина стенки увеличилась на 8,5 %, а при обжатии на 17, $\tau_{п} = 1,8^{\circ}$, толщина стенки увеличилась на 14,3 %. Поскольку очаг деформации имеет два обжимных участка, то интенсивность изменения толщины стенки на них различна. Приведенные значения углов $\varphi_{п}$ и $\tau_{п}$ меньше, чем значения соответствующих углов при анализе результатов, полученных на стане МИСиС 130. Поскольку, приведённые значения угла $\varphi_{п}$ меньше 10° , результаты, определенные по эмпирической зависимости (31) будут менее точными, чем при постоянном значении

угла φ . Интенсивность изменения толщины стенки в валках с калибровкой рисунк 29 в большей степени зависит от приведенного значения угла $\varphi_{п}$ и выражается приведенным значением угла $\tau_{п}$. Поэтому, изменение толщины стенки в данном случае необходимо определять согласно уравнению (16)

Анализ полученных данных, в результате проведения экспериментальной прокатки на стане МИСиС 130 и исследований изменения толщины стенки в промышленных условиях при опытной прокатке на ТПА 160 подтверждает проведенные теоретические исследования и результаты компьютерного моделирования.

Таблица 18 – Геометрические параметры образцов ТПА -160

Номер образца п/п	Размеры черновых труб			Суммарное обжатие %	Размеры труб после редуцирования на калибровочном стане ТПА 160				Приведенные значения углов	
	D_p , мм	S_p , мм	D_p/S_p	ε_d , %	D_T , мм	S_T , мм	D_T/S_T	ΔS , в %	$\varphi_{п}$ град	$\beta_{п}$, град
1	110	21	5,2	11,0	97,3	22,8	4,3	8,5	4,8	1,4
2	110	21	5,2	13,0	95,5	23,2	4,1	10,5	5,2	1,6
3	110	21	5,2	17,0	91,4	24,0	3,8	14,3	5,9	1,8

Основываясь на теоретических, экспериментальных исследованиях и компьютерном моделировании можно отметить:

-интенсивность изменения толщины стенки в очаге деформации трехвалкового стана, выраженная углом τ и имеет наибольшую зависимость от D/S гильзы и суммарного обжатия по диаметру;

- в очаге деформации образованным валками с несколькими обжимными участками, угол τ характеризует изменение толщины стенки по очагу деформации в целом, а изменение толщины стенки может быть определено согласно по значению приведенного угла $\varphi_{п}$.

Опираясь на экспериментальные данные и теоретические исследования, необходимо отметить, что отношение диаметра к толщине стенки готовой

трубы и черновой трубы (гильзы) имеют зависимость, которую можно представить уравнением:

$$\frac{D_K}{S_K} = \frac{D_{ч}}{S_{ч}} \cdot \frac{(1-\varepsilon_d)}{(1+\varepsilon_s)} = \frac{D_{ч}}{S_{ч}} \cdot \theta \quad (32)$$

Где $\frac{D_K}{S_K}, \frac{D_{ч}}{S_{ч}}$ – отношение диаметра к толщине стенки готовой и черновой трубы соответственно;

ε_d – относительное обжатие по диаметру;

ε_s – относительное изменение толщины стенки.

θ – коэффициент изменения отношения диаметра к толщине стенки при редуцировании.

Для того, чтобы определить зависимость изменения отношения диаметра к толщине стенки от относительного обжатия черновой трубы по диаметру применительно к опытной прокатке на ТПА-160 на рисунке 44 построена зависимость данных параметров, полученная по фактическим данным.

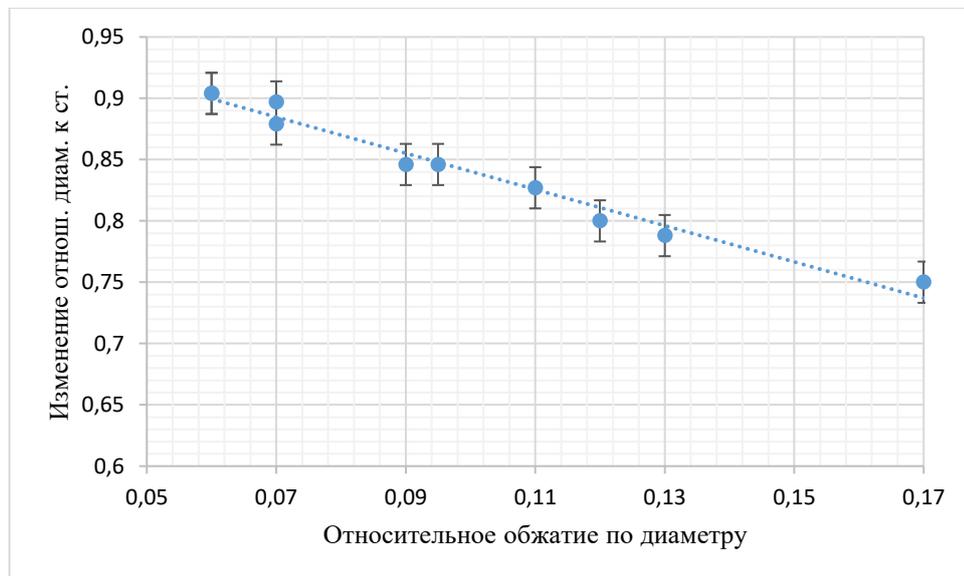


Рисунок 44 – Зависимость θ от ε_d

Коэффициент корреляции между двумя параметрами составляет -0,987, что позволяет представить данную зависимость в виде линейной. На график

нанесена стандартная погрешность. Видно, что с увеличением обжатия, параметр θ уменьшается. Параметр θ можно определить по экспериментальной зависимости:

$$\theta = -1,55 \cdot \varepsilon_d + 1,006 \quad (33)$$

Определение коэффициента θ по экспериментальной зависимости (33), позволяет определить изменение геометрических размеров трубы при ее безоправочной прокатки и определить отношение D/S исходной гильзы при расчете режимов деформирования и таблицы прокатки. Относительное изменение толщины стенки при безоправочной прокатки можно выразить следующим образом:

$$\varepsilon_s = 0,5 \cdot \varepsilon_d \cdot \frac{D_k}{S_k} \cdot \frac{\operatorname{tg}(\tau) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\varphi))}{\theta \cdot \operatorname{tg}(\tau) \cdot (1 - \operatorname{tg}(\tau) \cdot \operatorname{tg}(\varphi))} \quad (34)$$

Уравнение (34) справедливо как для случаев, когда толщина стенки увеличивается, это во всех рассмотренных выше случаях, когда угол $\tau > 0$, так и в случаях, когда толщина стенки уменьшается. Вторым случаем характерен для деформирования толстостенных гильз с D/S менее 4 [21, 22]. Это так же отмечается в работах [28].

4.6 Внедрение процесса раскатки с большими обжатиями на ТПА 160

Основываясь на проведенных исследованиях процессов раскатки и безоправочной прокатки с повышенными обжатиями по диаметру, разработан способ прокатки бесшовных труб применительно к ТПА 160. Основным отличием нового способа от используемого на ТПА 160 является применение дополнительного обжатия, до 40 % по диаметру, в раскатном стане и осуществление процесса калибрования черновых труб с обжатием по диаметру до 15 %.

Разработанный способ позволяет перераспределить коэффициенты вытяжки между прошивным, раскатным и калибровочным станами с увеличением вытяжки при раскатке и калибровании. Это позволяет более рационально распределить деформацию на основных этапах получения бесшовной трубы, дает возможность получить качественные бесшовные трубы широкого размерного сортамента при сохранении размерного ряда гильз. С другой стороны, это позволяет сократить размерный ряд используемых сплошных заготовок, вместе с тем, приводит к возможности использовать непрерывнолитую заготовку для широкого размерного сортамента получаемых труб, исключив операцию дополнительного переката заготовок на меньший диаметр.

Разработанные калибровки рабочих валков позволяют увеличить технологическую маневренность трубопрокатного агрегата, в результате чего, становится возможно осуществлять процесс раскатки с применением новых и существующих режимов прокатки.

4.6.1 Промышленное опробование технологии и калибровок

Целью опытно-промышленной прокатки является оценка возможности применения способа прокатки труб с повышенными обжатиями в раскатном и калибровочном станах. При выполнении опытно-промышленной прокатки поставлены следующие задачи:

- провести анализ точности геометрических размеров труб и механических свойств;
- оценить энергосиловые параметры раскатки и калибровки;
- исследовать износ рабочих валков калибровочного и раскатного станков.

В таблице 19 представлен размерный и марочный сортамент труб, полученных при опытно-промышленной прокатке, а также количество труб в тоннах.

Таблица 19 - Размерный и марочный сортамент труб опытно-промышленной прокатки

Стан	Размер готовой трубы		Количество	Марка стали
	D, мм	S, мм	Тонн	
Раскатной	63,5	7,5-12,4	113,0	20К, 35, 40Х, ШХ15
	88,9-89,0	13,0	280,3	37Г2Ф, ДБ
			339,3	
Калибровочный	82,5-83,0	10,0-16,0	29,4	17Г2С, ШХ15
	89,0-91,0	10,0-20,0	179,4	17Г2С, 19ХГН, 20, 20А, 35, 37Г2Ф, 38Х2МЮА, 40Х
	93,0-95,0	10,0-16,0	155,2	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 20А, 20Х, 35, 37Г2Ф, 38Х2МЮА, 40Х
	101,6-102,0	13,0-22,0	41,9	17Г1С, 35, 37Г2Ф, 45
	108,0-109,0	11,0-28,0	269,8	09Г2С, 17Г1С, 18ХМФБ, 20, 30ХГСА, 30ХГМА, 37Г2Ф, 45
	114,0-114,3	12,0-32,0	131,7	09Г2С, 15Х5М, 17Г1С, 20, 30ХГСА, 37Г2Ф, 40Х
	121,0	12,0-28,0	152,6	10, 15Х, 17Г1С, 20Х, 30ХГСА, 35, 40Х, 45
	127,0-128,0	13,0-32,0	303,4	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 20Х, 30ХГСА, 35, 35ХГСА, 37Г2Ф, 45, ДБ
	133,0-133,1	13,0-35,0	217,5	10, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 17Г1С, 18ХГТ, 20, 30ХГСА, 35, 37Г2Ф, 40Х, 45
	139,7-140,0	14,0-30,0	286,1	09Г2С, 10, 15ХМ, 17Г1С, 20, 20К, 30ХГСА, 30ХГСН2А, 35
	146,0	16,0-38,7	176,2	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 20К, 30ХГСА, 35ХГСА, 40Х
	152,0-152,4	16,0-36,0	266,0	09Г2С, 17Г1С, 20, 30ХГСА, 35, 40Х, 45
	159,0	16,0-34,0	270,5	09Г2С, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 17Г1С, 20, 35ХГСА
	165,0-168,3	20,0-35,0	93,7	12Х1МФ, 13ХФА, 15Х1М1Ф, 17Г1С, 20, 32ХА, 37Г2Ф, 45
	178,0-180,0	20,0-45,0	84,4	20, 30ХГСА, 40Х, 45, ШХ15
	187,7-189,0	16,5-22,6	557,6	30ХГМА, ДБ
	193,7-194,5	22,0-45,0	132,2	17Г1С, 30ХГМА, 30ХГСА, 35, 40Х, 45
	203,0	25,0-45,0	113,1	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 35, 40Х, 45
			3560,7	

4.6.2 Качество труб

На рисунке 45 представлены фотографии наружной и внутренней поверхности патрубка трубы, выбранной из партии полученной опытно-промышленной прокаткой.



а



б

Рисунок 45 – Качество поверхности: а – наружная поверхности трубы, б – внутренняя

Наружная и внутренняя поверхность патрубка не имеет визуальных дефектов. Поверхность ровная без морщин плен и накатов. В процессе калибрования с обжатием до 17 % на внутренней поверхности труб не обнаружены морщины и складки. Процесс прокатки осуществляется стабильно. Было отмечено улучшение качества наружной поверхности по сравнению с трубами, прокатанными по штатной технологии.

ПНТЗ были проведены испытания механических свойств труб, изготовленных при проведении опытной и опытно-промышленной прокатки. Как отмечено в акте (Приложение 1), механические свойства полученных труб соответствуют нормативной документации. В таблице 20 представлены результаты испытаний механических свойств предоставленные ПНТЗ для трубы диаметром 88,9 мм – 93,17 мм прокатанных с новыми режимами и калибровками валков.

Таблица 20 – Механические свойства, данные ПНТЗ

Марка стали	Диаметр, мм	Стенка, мм	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Врем. Сопротивление, МПа	отношение	Относительное сужение %
37Г2Ф	88,9	12,2	570	20	820	0,70	61,5
			550	22	800	0,69	61,5
38Г2С	93,17	11,8	532	25	801	0,65	
			517	21	807	0,64	
			519	24	789	0,66	
			505	22	792	0,64	
			509	23	800	0,64	
			506	25	794	0,64	
37Г2Ф	88,9	13	584	19	892	0,66	

Процесс раскатки и калибрования с повышенным обжатием по диаметру позволяет осваивать новые режимы прокатки труб из непрерывнолитой заготовки, в том числе заготовки диаметром 220 мм. АО ПНТЗ по разработанной технологии проведена пробная прокатка труб в количестве 70 шт. диаметром

168 с толщиной стенки 22 мм из непрерывнолитой заготовки 220 мм. Прокатаны трубы диаметром 89 мм с толщиной стенки 14 мм из непрерывнолитой заготовки 156 мм. Дополнительное обжатие по диаметру в раскатном стане составляло 50 мм. Получившиеся трубы соответствуют требованиям нормативной документации.

В приложении А представлен Акт «Промышленного опробования на ТПА 160 процесса прокатки и рабочего инструмента трехвалковых станов винтовой прокатки с целью повышения редуцирования по диаметру» в котором указаны размеры труб и их соответствие качеству.

Точность геометрических размеры труб, характеризуется разностенностью и овальностью. У всех труб, полученных опытно-промышленной прокаткой, осуществлялся анализ разностенности в поперечном сечении и по длине, а также анализ овальности труб. На рисунке 46 представлена кумулятивная кривая накопленных частот разностенности труб, полученных опытно-промышленной прокаткой. Максимальная разностенность для всех труб составляет 10 %, что соответствует точности труб по ГОСТ 8732–78 [73].

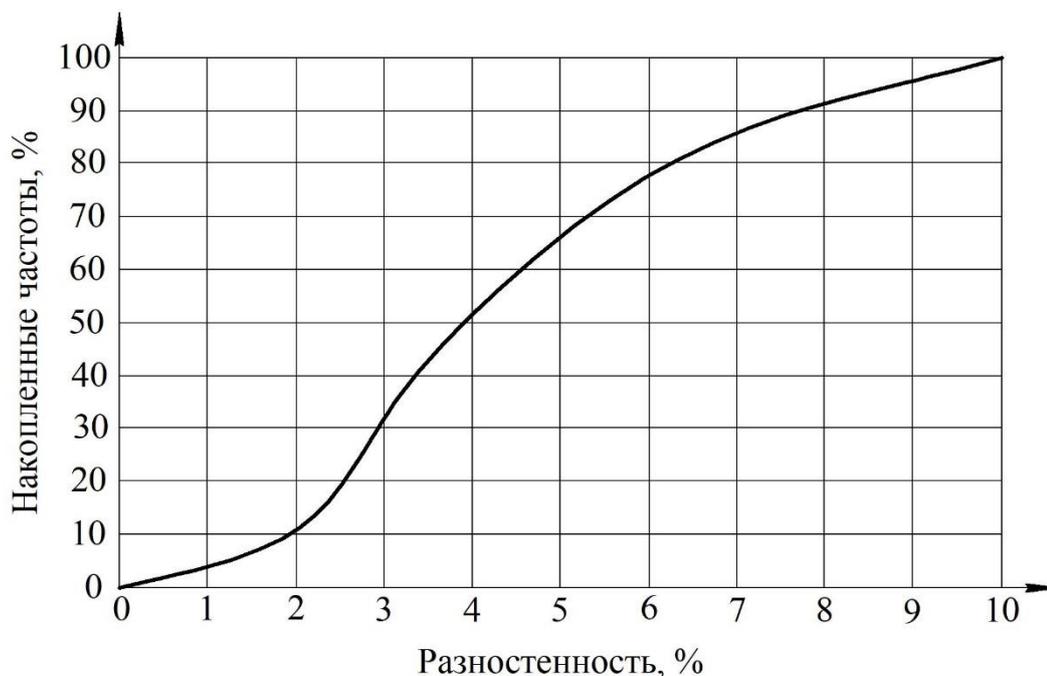


Рисунок 46 – Разностенность труб, полученных опытно-промышленной прокаткой

Разностенность большинства труб укладывается в интервал 2,5-6 %, что соответствует повышенной точности и характерна для трубопрокатных агрегатов со станами винтовой прокатки. Для таких агрегатов разностенность может составлять до 12 % или с отклонением ± 6 %.

На рисунке 47 представлена кумулятивная кривая накопленных частот овальности труб опытно-промышленной прокатки.

Овальность диаметральных размеров не превышает 1,1 %, что так же соответствует требованиям ГОСТ 8732–78 [73]. Большинство труб имеют овальность диаметральных размеров в интервале 0,2...0,5 %.

Анализ тонности геометрических размеров показывает, что все трубы, полученные опытно-промышленной прокаткой, отвечают требованиям.

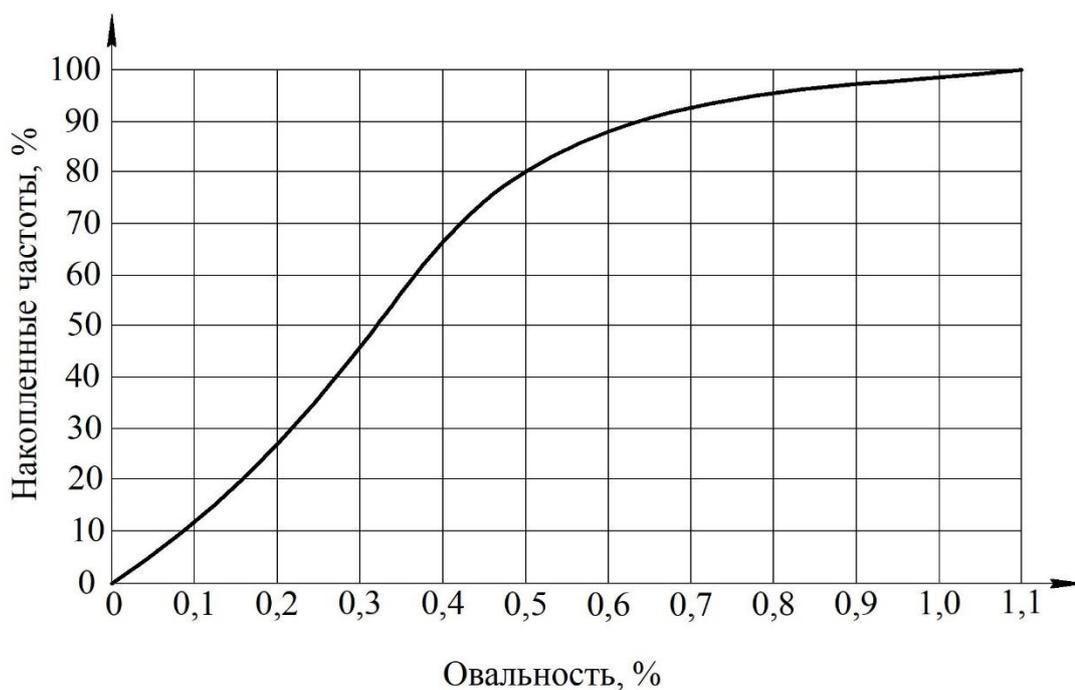


Рисунок 47 – Овальность труб, полученных опытно-промышленной прокаткой

Следует отметить, что повышенные обжатия труб по диаметру в раскатном и калибровочном стане, а также применение новых калибровок валков оказывают положительное воздействие на качество геометрических размеров

и формы полученных труб. Все прокатанные трубы удовлетворяют повышенной точности по толщине стенки и диаметру.

4.6.3 Энергосиловые параметры

Раскатка труб с повышенным обжатием приводит к увеличению зон редуцирования и обжатия по толщине стенки гильзы. Это, в свою очередь, ведет к повышению усилия действующего со стороны металла на валок, момента прокатки и мощности. При опытно-промышленной прокатки осуществлялся контроль энергосиловых параметров: мощности прокатки и крутящего момента.

В таблице 21 представлены результаты замера мощности и крутящего момента на валке для партий труб, полученных из заготовок диаметром 150, 156 и 220 мм раскаткой в валках с калибровкой (рис. 28). Суммарное обжатие по диаметру при раскатке составляет 11-33 %. По отношению к процессу раскатки по штатным (используемым) режимам с дополнительным обжатием по диаметру менее 5 %, мощность процесса раскатки с обжатием по диаметру до 36 % увеличились на 20...45 %.

Таблица 21 – Мощность и крутящий момент

Диаметр заготовки, мм	Размеры гильз, D _г xS _г	Марка стали	Размеры черновых труб, D _т xS _т	Доп. обж. по диам. уч. редуц., %	Обжатие по диаметру, %	Мощность кВт	Крутящий момент кН·м
220	217x22,9	30ХГМА	193,0x17,6	6,2	11,1	1176	27,0
156	144x23,3	37Г2Ф	96,5x12,3	17,7	33,0	1143	28,0
150	148x28,5	38Г2С	111,0x18,0	12,2	26,4	1690	30,0

Мощность раскатки по штатным режимам, в зависимости от диаметра труб, суммарного обжатия по толщине стенки и марки стали меняется в пределах 600...900 кВт. По результатам опытно-промышленной прокатки с обжатием по диаметру до 36 %, мощность раскатки составляет 1143-1690 кВт. Что соответствует техническим характеристикам привода раскатного стана.

В таблице 22 представлены: мощности и крутящий момент процесса калибрования с партий труб с обжатием по диаметру 6, 12 и 17 %. Калибрование осуществлялось в валках с калибровкой рис. 29.

Таблица 22 – Энергосиловые параметры

Размеры черновой трубы $D_T \times S_T$	Размеры готовой трубы $D \times S$	Марка стали	Обжатие по диаметру, %	Мощность, кВт	Крутящий момент на валу, кН·м
110x21	103,5x22	37Г2Ф	6	77,0	7,1
	97,2x23		12	117,0	13,0
	91,4x23		17	191,0	18,0

При калибровании труб с обжатием до 17 % мощность процесса деформации увеличивается до 191 кВт. Безопробочная прокатка труб с обжатием по диаметру более 17 % не рекомендуется на калибровочном стане ТПА 160, поскольку привод ограничен по мощности. При этом, образования дефектов формы «гранения» приводит к росту мощности прокатки.

4.6.4 Разработка таблицы прокатки труб

Результаты опытной и опытно-промышленной прокатки показали, что процесс раскатки с обжатием по диаметру до 40 % применим в условиях ТПА 160. Качество получаемых труб удовлетворяет требованиям. Уровень энергосиловых параметров при раскатке с дополнительным обжатием по диаметру приемлем для раскатного стана ТПА 160. Валки с калибровкой (рисунок 28) позволяют вести процесс раскатки с дополнительным обжатием стабильно.

Процесс калибрования труб с обжатием до 17 % так же осуществим, однако осуществляется менее стабильно. Чтобы повысить технологичность калибровочного стана и возможность ведения процесса калибрования более стабильного необходимо минимизировать влияние внешнего воздействия на прокатываемую трубу. Для этого необходимо осуществить точную настройку входной, выходной стороны стана использовать проводки позволяющие качественно фиксировать трубу в процессе прокатки.

Наиболее перспективным исправлением увеличения редуцирования в технологическом процессе производства труб на ТПА 160 с целью использования непрерывнолитой заготовки является применение способа раскатки с дополнительным обжатием по диаметру на раскатном стане.

Применение процесса раскатки с дополнительным обжатием по диаметру на раскатном стане ТПА 160 имеет ряд существенных преимуществ перед процессом безоправочной прокатки на калибровочном стане, а именно:

- 1) редуцированию подвергаются гильзы, которые имеют стенку большего размера и значительно меньшую длину, что, как показала опытная прокатка, существенно повышает устойчивость процесса;
- 2) наличие оправки в процессе редуцирования значительно снижает вибрацию заготовки и выходящей черновой трубы, повышает устойчивость процесса;
- 3) раскатка, следующая за редуцированием, позволяет контролировать толщину стенки трубы и обеспечивает более высокое качество её внутренней поверхности за счет раскатки на оправке.

В таблице 23 представлены режимы прокатки труб диаметром 95 мм со стенкой 10-20 мм из непрерывнолитой заготовки 156 мм с применением дополнительного обжатия по диаметру, а также этих труб из заготовки диаметром 120 мм по штатной технологии.

Таблица 23 – Разработанная таблица прокатки труб на ТПА 160 с новыми режимами прокатки

Размер труб, мм		Диам. загот., мм	Сумм выт.	Прошивной стан			Раскатной стан			Калибровочный стан	
Диаметр	Стенка			Диаметр, мм	Стенка, мм	вытяжка	Калибр, мм	Диаметр, мм	Стенка, мм	Диаметр, мм	Стенка, мм
89	14	120	3,36	117	24	1,61	90	92,1	14	90,1	14
95	14	130	3,11	124	24	1,5	97	98,1	14	96,1	14
102	14	130	3,36	130	24	1,66	103	105,2	14	103,2	14
108	14	140	3,65	135	24	1,84	108	111,3	14	109,3	14
114	14	140	3,43	142	24	1,37	115	117,4	14	115,4	14
121	14	150	3,68	149	24	1,88	122	124,5	14	122,5	14
Разработанные режимы прокатки из НЛЗ диаметром 156 мм											
89	14	156	5,71	147,6	24	2,051	92	94,6	14	90,1	14
95	14	156	5,29	150,9	24	1,997	98	100,9	14	96,1	14
102	14	156	4,87	151,5	24	1,989	105	108,4	14	103,2	14
108	14	156	4,56	151,5	24	1,989	108	111,5	14	109,3	14
114	14	156	4,29	157,7	24	1,896	115	117,7	14	115,4	14
121	14	156	4,09	157,7	24	1,937	122	124,9	14	122,5	14
152	20	180	3,01	181	30	1,79	154	155,8	20	153,8	20
159	20	190	3,18	187	30	1,92	160	162,9	20	160,9	20
168	20	190	2,99	197	30	1,8	170	172	20	170	20
178	20	210	3,42	207	30	2,08	180	182,1	20	180,1	20
Разработанные режимы прокатки из НЛЗ диаметром 220 мм											
152	20	220	4,52	213,5	30	2,198	158	161,5	20	153,8	20
159	20	220	4,29	218,7	30	2,137	166	169	20	160,9	20
168	20	220	4,03	218,7	30	2,137	170	173,4	20	170	20
178	20	220	3,78	218,7	30	2,137	180	183,7	20	180,1	20

Разработанные режимы раскатки позволяют существенно сократить размерный ряд используемых сплошных заготовок, что наиболее актуально при применении непрерывнолитой заготовки.

В таблице 23 приведены размеры труб на всех стадиях прокатки при их получении по штатной технологии ТПА 160 и с дополнительным обжатием по диаметру в раскатном стане на 30 – 50 мм. Трубы, диаметром 89 мм по штатной технологии получается из заготовки диаметром 120 мм, дополнительное обжатие по диаметру в раскатном стане позволяет получить такую трубу из заготовки диаметром 156 мм.

Трубы, диаметром 89 – 121 мм можно получать из НЛЗ диаметром 156 мм без предварительного ее переката на диаметры 120–150 мм. При этом количество типоразмеров используемой заготовки сокращается в шесть раз. Трубы, диаметром 152–178 мм можно получать из НЛЗ диаметром 220 мм, без предварительного переката на диаметры 180 – 210 мм с использованием дополнительного обжатия по диаметру на 30 – 55 мм в раскатном стане. При этом количество типоразмеров заготовки сокращается в четыре раза.

По разработанным режимам и калибровкам валков подана заявка на патент. Заявка «Способ раскатки полой заготовки на оправке в трехвалковом стане винтовой прокатки и рабочий валок для его осуществления» номер 2019129695 от 19.09.2019 г.

Выводы

В результате комплексных исследований, разработаны и внедрены новые научно-технические решения, повышающие производственную мобильность ТПА-160. Новые калибровки валков и режимы прокатки на раскатном и калибровочном станах позволяют существенно расширить размерный сортмент труб, производимых из одной заготовки, в том числе непрерывнолитой.

Экспериментальными исследованиями и компьютерным моделированием установлено, что наибольшее влияние на деформационные параметры оказывает отношение D/S трубы и калибровка рабочих валков. Для безоправочной прокатки труб с D/S равным 5–10 разработана рациональная калибровка рабочих валков без гребня с углом наклона образующей к оси прокатки $5-10^\circ$.

Разработана методика анализа деформационных параметров и силовых условий процессов раскатки и безоправочной прокатки, позволяющая учесть наличие овальности трубы в очаге деформации техвалкового стана. Установлена аналитическая зависимость контактного напряжения от диаметра рабочих валков, толщины стенки трубы, коэффициента, учитывающего влияния внешних зон при раскатке, на участках редуцирования и обжатия стенки трубы.

Осуществлено исследование геометрических размеров труб и разработана методика расчета изменения толщины стенки трубы в зоне редуцирования при прокатке с повышенными обжатиями по диаметру. Применительно к ТПА 160 разработаны калибровки и технологические режимы раскатки труб с обжатием по диаметру до 50 % и калибрования (редуцирования) с обжатием по диаметру до 15 %.

Разработаны валковые узлы трехвалковых станов винтовой прокатки с повышенной грузоподъемностью (в два раза) подшипниковых опор, которые позволяют расширить сортмент прокатываемых труб.

Внедрение разработанных технических решений позволило освоить на ТПА-160 производство более 10-ти типоразмеров труб из непрерывнолитой заготовки диаметром 156, 220 мм.

Библиографический список

1. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и пресование труб. – М.: Металлургия. 1972, 576 с.
- 2 Трубное производство: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.
- 3 Чикалов С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки. – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999, 416 с.
- 4 Романцев Б.А. 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.
- 5 Барабашкин В.П., Тартаковский И.К. Производство труб на агрегатах с трехвалковым станом М.: Металлургия, 1981. 448 с.
- 6 Потапов И.Н. Пути повышения производительности трехвалкового раскатного стана / И.Н. Потапов, М.А. Минтаханов, Б.А. Романцев, В.Н. Умеренков // труды московского института стали и сплавов: научн. Труды/МИСиС – М.: Металлургия выпуск 100.
- 7 Осадчий В.Я. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: «Интермет Инжиниринг» 2001 г., 608 с.
- 8 А.П. Коликов. Машины и агрегаты трубного производства уч. Для вузов / Коликов А.П., Романенко В.П., Самусев С.В. и др. – М.: «МИСиС» 1998 г. 536 с.
- 9 Романцев Б.А. Винтовая прошивка в трубном производстве: учеб. пособие / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, А.С. Алещенко. – М.: изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2017. – 262 с.
- 10 Крупман Ю.Г. Современное состояние мирового производства труб / Ю.Г. Крупман, Л.С. Ляховецкий, О.А. Семенов и др. – М.: Металлургия, 1992 г. 353 с.

11. Есаулов, А. Т. Совершенствование производства нарезных труб нефтяного сортамента / Тематическая подборка / А. Т. Есаулов, А. И. Козловский, В. М. Кирсанов, В. Н. Умеренков, А. А. Чернявский // Сталь . – 15/01/1981. – № 1. – 14-15 .

12 Пат. 2604545 Российская Федерация, МПК В21В31/07 Опорный узел / Келлер Карл, Алькен Йоханнес, Рейнг Конрад; Заявитель и патентообладатель СМС ГРУП ГМБХ. – №2014153914/02; заявл. 07.06.2013, бюл. №21.

13 Зимовец В.Г. Совершенствование производства стальных труб. / В.Г. Зимовец, В.Ю. Кузнецов, А.П. Коликов – М.: МИСиС 1996. 480с.

14 Данченко В.Н. Технология трубного производства: учеб. Для вузов России и Украины / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 640 с.

15 Друян В.М. Производство стальных труб / В.М. Друян, Ю.Г. Крупман, Л.С. Ляховский и др. – М.: Metallurgia 1989. – 400 с.

16 Демин А.В. Совершенствование технологических процессов разлива на мнлз по снижению дефектов и улучшению качества литой круглой заготовки / А.В. Демин, А.И. Рожков, А.Н. Пайташ, В.В. Николаев // Черная металлургия. 2014. № 9 (1377). С. 41-46.

17 Сафронов А.А. Освоение производства НЛЗ диам. 550 мм из трубных марок стали на МНЛЗ № 2 в ЭСПК "Железный озон 32" / А.А. Сафронов, В.И. Тазетдинов, Г.В. Торохов. // Сталь, № 10, 2013 г. С 58-62

18 Матвеев Б.Н. Горячая прокатка труб. / Б.Н. Матвеев – М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. 142 с.

19 Romantsev B. A. Improving the regimes used for hot-rolling tubes on mini tube-production unit 70–270 / B.A. Romantsev, A.V. Goncharuk, A.S. Aleshchenko et al. // Metallurgist. 2015. No 5 - 6. P. 386 – 389.

20 Romantsev, B. A. New technology for pipe rolling on mini mills. / Romantsev, B. A. // Steel in Translation, 2011, No 41(12), p. 1019-1024.

21 Потапов И. Н. Редуцирование на стане винтовой прокатки /И.Н. Потапов, Б.А. Романцев, В.И. Шаманаев. и др. // Теория и технология деформации металлов: сб. науч. тр. / МИСиС. 1976. № 69. С. 15 – 18.

22 Шаманаев В.И. Исследование процессов винтовой прокатки толсто-стенных гильз и труб: дисс. К.т.н. 05.167.05/ В. И. Шаманаев, И. Н. Потапов. – М.: [МИСиС], 1979 . – 251.

23 Ю.Ф. Шевакин Производство труб / Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. – М.: Metallurgy, 1968, 440 с.

24 Kazuyuki Nakasujl. Reduce rolling characteristics of hollow piece by rotary rolling mill. / Kazuyuki Nakasujl, Kouichi Kuroda, Chihiro Hayash – ISIJ international, vol. 36 (1996), No. 5, p.p. 576-578.

25 Pat. US. No 4409810, B 21 B 19/06. Process for manufacturing seamless metal tubes / Yamada T. 1983.

26 Pat. US No 4416134, B21B 19/04. Process for manufacturing seamless metal tubes Chihiro Hayashi, Amagasaki, assignee Sumitomo Metal Industries, Ltd., Osaka, Japan – No 281,901, filed Jun 9, 1981, Date of Patent Nov. 22, 1983.

27 Pat. US 3495429, B 21 B 19/06. Method of reducing tubes, especially thick walled tubes and means for practicing the method / Muller G. 1966.

28 Pat. US No 4510787, B21B 19/04. Method of manufacturing hollow rods Chihiro Hayashi, Kazuyuki Nakasuji; assignee Sumitomo Metal Industries, Ltd., Osaka, Japan – No 508,718, filed Jun 28, 1983, Date of Patent Apr. 16, 1985.

29 Павлов И.М. Теория прокатки. / И.М. Павлов – М.: Metallurgy, 1950. 610 с.

30 Губкин С.И. Пластическая деформация металлов т 3 / С.И. Губкин – М.: Metallurgy, 1961

31 Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением. / А.Д. Томленов – М.: Mashgiz, 1963, 234 с.

32 Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. П.К. Тетерин – М.: Metallurgy, 1983. 270 с.

- 33 Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. / А.И. Целиков – М.: металлургиздат, 1963, 262 с.
- 34 Коликов А.П. Исследование процессов поперечно-винтовой прокатки. / А.П. Коликов – 1966 г.
- 35 Лапин Л.И. Исследование удельного давления при поперечной и поперечно-винтовой прокатке сплошных и полых тел дисс. К.т.н. /. 05.167.05: Л.И. Лапин – М., 1970 г.
- 36 Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учеб. Для студ. Вузов /В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия – 1986. – 688 с.
- 37 Тюрин В.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Тюрин, А.И. Мохов. – ВолгГТУ, Волгоград, 2000. – 416 с.
- 38 Илюкович Б.М. Теоретические основы обработки металлов давлением / Б.М. Илюкович А.П. Огурцов, Н.Е. Нехов и др. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2001 516 с.
- 39 Голенков В.А. Теория обработки металлов давлением: учеб. Для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин и др. – М.: Машиностроение. 2013 442 с.
- 40 Тюрин В.А. Теория и процессы ковки слитков на прессах / В.А. Тюрин – М.: машиностроение, 1977. - 239
- 41 Коликов А.П. Теория обработки металлов давлением: учеб. / А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М.: изд. Дом МИСиС, 2015. – 451 с.
- 42 Никулин А.Н., Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. / А.Н. Никулин - М.: Металлургия, 2014. – 430 с.
- 43 Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: изд-во МГУ, 1978. 278 с.
- 44 Потапов И.Н. Теория трубного производства: учеб. Для вузов / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян – М.: Металлургия, 1991. 424 с.
- 45 Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин – М.: Металлургия 1990 344 с.

46 Данченко В.Н., Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. / В.И. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск: «Системные технологии», 2005. – 448 с.

47 Харитонов Е.А., Будников А.С. Распределение удельной силы металла на валок в процессе раскатки труб на трехвалковом стане винтовой прокатки / Е.А. Харитонов, А.С. Будников // изв. Вузов Черная металлургия – 2016. № 9 (59). С. 628-633.

48 Минтаханов М.А. Исследование и совершенствование процесса раскатки труб и оборудования на установках с трехвалковым раскатным станом: дисс. к.т.н. 05.167.05/ М.А. Минтаханов, 1979 г.

49 Харитонов Е.А. Разработка методики расчета деформационных параметров при раскатке гильз в трехвалковом стане винтовой прокатки. / Е.А. Харитонов, В.П. Романенко, А.С. Будников // изв. Вузов Черная металлургия. 2016. № 3 (59). С. 167-172.

50 Свид. 2016619610 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета энергосиловых параметров раскатки труб в трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки (ESP) / А.С. Будников, Е.А. Харитонов; заявитель и правообладатель ФГАОУВО «НИТУ «МИСиС». – 2016616813/69; заявлена 28.06.2016; опублик. 24.08.2016, Реестр программ для ЭВМ – 1 с.

51 Анисифоров В.П. Редукционные станы. / В.П. Анисифоров, Л.С. Зельдович, В.Д. Курганов и др. – м.: металлургия 1971. – 255 с.

52 Romancev, B.A., Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling / B.A. Romanev, A.V. Goncharuk, A.S. Aleshchenko, Y.V. Gamin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. 56(5), p. 522-526.

53 Pavlov, D.A. Effect of Kinematic Tension Coefficient on Wall Thickness Variation for Tube/Pipe Rolled in a Reducing Mill / D.A. Pavlov, A.A. Bogatov, E.A. Pavlova, // Metallurgist. – 2018 62(3-4), с. 203-206.

54 Jiang, Y Method for improving transverse wall thickness precision of seamless steel tube based on tube rotation. / Jiang, Y, Tang, H. // Journal of Iron and Steel Research International, – 2015, 22(10), 924-930.

55 Шаповал А.Н. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена: Монография / А.Н. Шаповал, С.М. Горбатюк, А.А. Шаповал – М.: Руда и металлы, 2006 – 351 с.

56 Gorbatyuk S. M. Screw-rolling mill design based on kinematic analysis / S.M. Gorbatyuk // Steel in Translation. 2000. Vol. 30. № 9. P. 52 – 55.

57 Горбатюк, С. М. Разработка новых технологий, оборудования и инструмента для производства изделий из тугоплавких металлов: дис. д.т.н.: 05.03.05 / С. М. Горбатюк. – М.: [МИСиС], 2003. – 391 с.

58 Харитонов Е.А., Особенности геометрии очага деформации и калибровка валков станов радиально-сдвиговой прокатки при больших углах подачи / Е.А. Харитонов, И.А. Буров, И.З. Вольшонок, Д.Е. Харитонов // Цветные металлы – 1995 г. № 8 с. 64-66.

59 Харитонов Е.А., Буров И.А., Романенко В.П., Вольшонок И.З. Совершенствование методики расчета геометрии очага деформации и калибровок валков станов радиально-сдвиговой прокатки при больших углах подачи / Е.А. Харитонов, И.А. Буров, В.П. Романенко, И.З. Вольшонок // изв. Вузов Черная металлургия – 2010. №3 с. 29-31.

60 Галкин С.П., Фадеев В.А., Гусак А.Ю. Методика виртуальных пережимов для расчета мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки / С.П. Галкин, В.А. Фадеев, А.Ю. Гусак // Производство проката. – 2016. № 2. С. 27-35.

61 Харитонов Е.А. Проектирование подшипниковых опор валковых узлов трехвалковых станов винтовой прокатки. / Е.А. Харитонов, Б.А. Романцев, А.С. Будников // известия высших учебных заведений. Машиностроение – 2017, № 6 т. 687, с 35-42.

62 ГОСТ 6364-78 Подшипники роликовые конические двухрядные. – М.: издательство стандартов, 1978 – 9с.

63 Свид. 2017613235 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета диаметра подшипников в подушках трехвалковых станов винтовой прокатки (Geometry_1) / А.С. Будников, Е.А. Харитонов, И.С. Деметрашвили; заявитель и правообладатель ФГАОУВО «НИТУ «МИСиС». – 2017613235/69; заявлена 17.01.2017; опубл. 14.03.2017, Реестр программ для ЭВМ – 1с.

64 Власов А.В. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / А.В. Власов, С.А. Стебунов, С.А. Евсюков, Н.В. Биба, А.А. Шитиков – М.: издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019 – 383 с.

65 Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов. / В.В. Шайдуров – М.: Наука, 1989. – 288 с.

66 Chenot J.L. Recent contributions to the finite element modelling of metal forming processes / J.L. Chenot // Journal of materials Processing Technology. – 1992. 34, p. 9-18.

67 Скрипаленко М.М. исследование особенностей напряженно деформированного состояния заготовок при разных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования. / М.М. Скрипаленко Хюи Чан Ба, Б.А. Романцев, С.П. Галкин, С.В. Самусев // Сталь – 2019 № 2, с. 35-39.

68 ГОСТ 57412 -2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий – М.: Сиандартинформ, 2018 – 9 с.

69 Харитонов Е.А. Моделирование процесса раскатки труб на трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки // Е.А. Харитонов, В.П. Романенко, А.С. Будников // Сталь – 2014, №10, с. 44-47.

70 Смирнова-Аляев Г.А Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. / Г.А. Смирноа-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л., «Машиностроение», 1972 г. 360 с.

71 Будников А.С., Харитонов Е.А., Исхаков Р.В., Сабуркин В.Д. Исследование редуцирования труб на трехвалковом калибровочном стане винтовой прокатки тпа-160. // «Сталь» 2019, № 8, с. 43-46.

72 Будников А.С. Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трехвалковом стане винтовой прокатки / А.С. Будников, Е.А. Харитонов, Ф.В. Сорокин // Сталь – 2017, №10, с 31-34.

73 ГОСТ 8732–78 Трубы стальные бесшовные горячекатаные – М.: издательство стандартов, 1978 – 9с.

Приложение 1

Акт использования результатов работы в учебной деятельности и примеры опубликованных работ



Директор учебной работе
В.Л. Петров
«19» *Август* 2019

АКТ

Настоящий Акт составлен в том, что методики расчета деформационных и энергосиловых параметров процессов раскатки и калибрования труб, а также проектирования валковых узлов с повышенной прочностью, грузоподъемностью и расчета максимального диаметра рабочего валка трехвалковых станов винтовой прокатки, созданные в рамках диссертационной работы Будникова А.С., «Совершенствование процессов раскатки, калибрования и оборудования трехвалковых станов винтовой прокатки с целью расширения технологических возможностей» используется в учебном процессе на кафедре Обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС». Методики расчета деформационных и энергосиловых параметров применяются при подготовке бакалавров по направлениям 15.03.02 «Технологические машины и оборудования», 22.03.02 «Металлургия» и магистров по направлениям 15.04.02 «Технологические машины и оборудования», 22.04.02 «Металлургия». Методики проектирования валковых узлов и расчета максимального диаметра рабочего валка применяются при подготовке бакалавров 15.03.02 «Технологические машины и оборудования» и магистров по направлениям 15.04.02 «Технологические машины и оборудования». Методики опубликованы в учебных пособиях: Основы теории и технологических процессов ОМД и трубного производства лаб. практикум. // М.: изд. Дом. МИСиС 2017 – 172 с.; Компьютерное моделирование технологических процессов ОМД лаб. практикум. // М.: изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 146 с.

Заведующий каф. ОМД

А.С. Алешенко

Ученый секретарь каф. ОМД

Т.Ю. Сидорова

Научный руководитель

Е.А. Харитонов

№ 2808

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

ИНСТИТУТ ЭКОТЕХНОЛОГИЙ И ИНЖИНИРИНГА

Кафедра обработки металлов давлением

Основы теории и технологических процессов ОМД и трубного производства

Лабораторный практикум

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ТРУБ В ТРЕХВАЛКОВОМ СТАНЕ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

(4 часа)

7.1. Цель работы

Изучение основных понятий процесса винтовой раскатки труб в трехвалковом раскатном стане. Определение деформационных и силовых параметров процесса. Принцип расчета, калибровка рабочих валков и режимов обжатия. Расчет удельного усилия металла на валок.

7.2. Теоретическое введение

На трехвалковом стане винтовой прокатки получают высокоточные толстостенные трубы из средне- и высоколегированных шарикоподшипниковых марок стали. Как правило, такие трубы используются в машиностроении для производства колец подшипников и т.д. Представленным способом можно получать толстостенные бесшовные трубы с соотношением диаметра к толщине стенки D/S до 12. В России эксплуатируются два трубопрокатных агрегата с раскатными станами винтовой прокатки: ТПА 50–200 на ОАО «Волжский трубный завод» и ТПА 40–160 на ОАО «Первоуральский новотрубный завод».

Одними из основных показателей при определении энергосиловых параметров процесса раскатки в трехвалковом стане, являются деформирующая сила и момент прокатки на валке. На основе полученных параметров осуществляется проверочный или проектный расчет валкового узла рабочей клетки, ее станины, а также остальных узлов и механизмов, воспринимающих усилие прокатки.

Деформирующую силу, или усилие со стороны металла на валок (далее – сила металла на валок), в процессе раскатки гильзы в трубу, можно определить, зная величину и распределения удельного усилия или напряжения на поверхности контакта металла с валком. Сила металла на валок на некоторой сколь угодно малой площадке кон-

№ 3856 МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

ИНСТИТУТ ЭКОТЕХНОЛОГИЙ И ИНЖИНИРИНГА

Кафедра обработки металлов давлением

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОМД

Лабораторный практикум

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2019

Лабораторная работа 6
**СОЗДАНИЕ СБОРКИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ
 ТРЕХВАЛКОВОГО СТАНА ВИНТОВОЙ
 ПРОКАТКИ В SolidWorks. РЕДАКТИРОВАНИЕ
 СБОРКИ В РЕДАКТОРЕ 3D ГЕОМЕТРИИ QShare**
 (4 часа)

6.1. Цель работы

Освоение навыков создания в SolidWorks моделей, включающих в себя валки, заготовку, толкатель и направляющие, позиционирования объектов в QShare и задание оси вращения в QShare для последующего моделирования процесса винтовой прокатки в QForm 3D.

6.2. Теоретическое введение

Трехвалковые станы поперечно-винтовой прокатки позволяют получать сплошные профили круглого сечения, а также бесшовные трубы. На них прокатывают оси шпинделей для текстильных веретен, шатуны, сошки рулевого управления, кожуи полуоси заднего моста автомобиля и многие другие изделия. Отходы металла при прокатке на таком стане незначительны. Валки этих станов (рис. 6.1) имеют одинаковый диаметр и расположены вокруг оси прокатки с одинаковым удалением друг от друга на угол 120° . Оси валков повернуты на угол подачи β – угол между осью валка и заготовкой в горизонтальной плоскости, позволяющий сообщить заготовке поступательное и вращательное движение, а так же на угол раскатки γ – угол между осью валка и заготовки в вертикальной плоскости, который определяет схему прокатки и форму валков (чашевидные при $\gamma < 0$, грибовидные при $\gamma > 0$, бочковидные при $\gamma = 0$). В процессе прокатки рабочие валки вращаются в одном направлении, а перемещение заготовки в очаге деформации обеспечивается наличием контактного трения между обрабатываемой заготовкой и рабочей поверхностью валков.

При моделировании процессов винтовой прокатки в трехвалковом стане важным этапом является создание сборки. Ниже рассмотрен пример создания в SolidWorks сборки очага деформации, состоящего из рабочих валков и заготовки. Моделирование прокатки осуществляется по следующим параметрам:

Диаметр рабочих валков D_6 , мм	98
Длина бочки валков L_6 , мм	90
Угол подачи, град	18
Угол раскатки, град (чашевидные валки)	10
Диаметр заготовки D_3 , мм	45
Длина заготовки L_3 , мм	100
Диаметр проката D_1 , мм	40
Обжатие по диаметру ΔD , мм	5
Диаметр калибра очага деформации $d_{к3}$, мм	40

На рис. 6.1 и 6.2 представлены схемы рабочего валка и заготовки с указанием размеров.

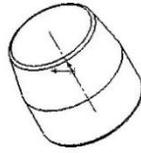
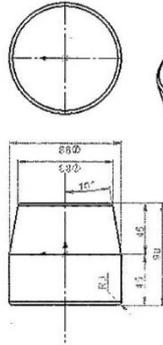


Рис. 6.1. Размеры валка

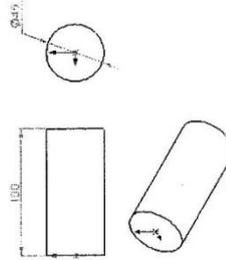


Рис. 6.2. Размеры заготовки

Лабораторная работа 7
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ
 ПРОКАТКИ В ТРЕХВАЛКОВОМ СТАНЕ**
 В QForm-3D
 (4 часа)

7.1. Цель работы

Освоение навыков моделирования процесса винтовой прокатки в QForm-3D и анализа полученных результатов.

7.2. Теоретическое введение

Моделирование процессов прокатки имеет некоторые особенности по сравнению с моделированием таких процессов ОМД, как прессование и штамповка, в которых деформирующий инструмент перемещается поступательно по прямой. В данной лабораторной работе показано, как задавать вращение валков в QForm-3D. Важной особенностью построения модели винтовой прокатки является наличие граничного условия «толкатель». Перемещающую заготовку в направлении прокатки, толкатель тем самым способствует захвату металла валками на начальной стадии.

Моделирование прокатки осуществляется по следующим параметрам:

Материал заготовки	Ст. 20
Температура заготовки, °С	1100
Материал валков	40X
Диаметр рабочих валков D_6 , мм	98
Длина бочки валков L_6 , мм	90
Угол подачи, град	18
Угол раскатки, град (чашевидные валки)	10
Частота вращения валков n , об/мин	60
Направление вращения	по часовой стрелке
Диаметр заготовки D_3 , мм	45
Длина заготовки L_3 , мм	100
Диаметр проката $D_{пр}$, мм	40
Обжатие по диаметру ΔD , мм	5
Диаметр калибра очага деформации d_c , мм	40
Температура валков, °С	100

• 86

Валки не сводить в контакт
 Условие трения на контактной поверхности:
 Закон трения Леванов
 Фактор трения 3
 Коэффициент теплопередачи, Вт/м²К 40000
 Коэффициент паузы 0,05

Координаты точек для установки оси вращения валков представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Координаты точек осей вращения валков

Точка	Координаты точек			Расположение торца валка		Расположение валка
	X	Y	Z	С входной стороны	С выходной стороны	
Точка 1	-42,15	77,57	13,69	С входной стороны	С выходной стороны	Валок 1 – верхний
Точка 2	42,15	61,94	-13,69	С входной стороны	С выходной стороны	Валок 2 – с правой стороны
Точка 3	-42,15	-50,64	60,33	С входной стороны	С выходной стороны	Валок 3 – с левой стороны
Точка 4	42,15	-19,11	60,49	С входной стороны	С выходной стороны	Валок 3 – с левой стороны
Точка 5	-42,15	-26,93	-74,02	С входной стороны	С выходной стороны	Валок 3 – с левой стороны
Точка 6	42,15	-42,83	-46,8	С входной стороны	С выходной стороны	Валок 3 – с левой стороны

7.3. Порядок проведения работы

Импортирование сборки в QFormVX

Для дальнейшей работы над сборкой необходимо открыть программу QFormVX и создать новый процесс с названием «Прокатка в трехвалковом стане».

Параметры задачи:

1. Деформация с учетом тепловых процессов.
2. Тип задачи – 3D.

После нажатия на кнопку «Вперед» предлагается загрузить файл 3D геометрии. Версия QForm VX позволяет загружать файлы двумя способами: предварительно отрендериванные в редакторе 3D геометрии QShape в формате *.shl, а также напрямую, из файла формата *.stp.

Загрузка геометрии, отредактированной в QShape

Для того чтобы загрузить файл формата *.shl, выберите команду «Загрузить из файла 3D», перейдите в нужную директорию и от-

87

Приложение 2

Акт промышленного опробования результатов работы и его приложение

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
М.Р. Филонов



УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления технологии,
научных исследований и разработок
В.А. Моргунов



2019

АКТ

Промышленного опробования на ТПА 160 процесса прокатки и рабочего инструмента трехвалковых станов винтовой прокатки с целью повышения редуцирования по диаметру

1. Разработана технология прокатки на трехвалковом раскатном стане позволяющая увеличить степень редуцирования до 15-25% вместо 3-10%.

Разработана калибровка рабочих валков для ведения процесса раскатки с дополнительным участком редуцирования, позволяющим вести процесс раскатки как по штатной технологии, так и с повышенными обжатиями. За период с 15.02 по 17.06.2019 г. на валках с новой калибровкой по штатной технологии было прокатано более 34 тыс. тонн труб всех размеров, по разработанной технологии (с увеличенными обжатиями на раскатном стане) прокатаны трубы Ø89-108 мм из заготовки диаметром 150-156 мм, а также Ø73 мм из заготовки диаметром 115 мм в количестве 135 тонн. Качество труб удовлетворяет требованиям НД. Расходный коэффициент металла в базовых показателях. Данная схема прокатки также позволяет произвести некоторое перераспределение коэффициентов вытяжки между прошивным и раскатным станами с увеличением вытяжки при раскатке путём увеличения обжатия по толщине стенки.

С целью расширения технологических возможностей ТПА 160 технология и калибровка рабочего инструмента предлагается к внедрению в промышленное производство.

2. Разработана технология редуцирования труб на калибровочном стане и калибровка рабочих валков, которая позволяет вести процесс прокатки труб по штатной технологии, а также с повышенным редуцированием до 15% по диаметру на толстостенных трубах (D/S менее 5,5-6,0).

Предложенная технология прошла промышленное опробование на калибровочном стане ТПА 160 при опытной прокатке 5 тонн труб.

Представители НИТУ «МИСиС»

Представители АО «ПНТЗ»

Заведующий кафедрой ОМД

Начальник ОНТ – главный технолог

А.С. Алешенко

Ю.Б. Белокозович

Научные руководители:

Начальник ГТПГ

профессор Б.А. Романцев

Ю.М. Чернышев

доцент Е.А. Харитонов

Ответственный исполнитель

Ведущий инженер-технолог

инженер А.С. Будников

Р.В. Исаков

АО «Первоуральский новотрубный завод»

Отдел производственных технологий – цех №49 (ГТПГТ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Опытно-промышленное производство труб на ТПА-160 с использованием опытных валков раскатного и калибровочного стана в период 08.10 по 19.11.2018 г»

Одним из условий проектирования новых калибровок валков раскатного и калибровочного стана являлась возможность работы по штатным режимам прокатки (с обжатием гильзы в раскатном стане до 27-28 мм и черновой трубы в калибровочном стане 1-3 мм). Для проверки работоспособности валков с опытными калибровками (Р-1676018.1 для раскатного и К-1676018.2 калибровочного стана), они были использованы для прокатки труб по штатной технологии до и после опытной.

Всего за период с 08.10 по 09.10.2018 года на валках раскатного стана было прокатано 393 т. Валки калибровочного стана испытывали в период с 25.10 по 26.10.2018 (до опытной прокатки) и с 06.11 по 19.11.2018 г. За это время в калибровочном стане было прокатано 3561 т труб.

Размерный и марочный сортамент труб, прокатанных в период опытно-промышленной эксплуатации валков, приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Размерный и марочный сортамент труб.

Стан - номер чертежа	Размер готовой трубы, мм			Количество		Марки стали
	D	S	D/S	т	%	
РС - Р1676018.1	63,5 (РС)	7,5-12,4	5,1-8,5	113	29	20К, 35, 40Х, 45, ШХ15
	88,9-89,0 (РС)	13,0	6,8	280,3	71	37Г2Ф, ДБ
				393,3		
КС - К1676018.2	82,5-83,0	10,0-16,0	5,2-8,3	29,4	1	17Г1С, ШХ15
	89,0-91,0	10,0-20,0	4,4-8,9	179,4	5	17Г1С, 19ХГН, 20, 20А, 35, 37Г2Ф, 38Х2МЮА, 40Х
	93,0-95,0	10,0-16,0	5,8-9,5	255,2	7	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 20А, 20Х, 35, 37Г2Ф, 38Х2МЮА, 40Х
	101,6-102,0	13,0-22,0	4,6-7,8	41,9	1	17Г1С, 35, 37Г2Ф, 45
	108,0-108,95	11,0-28,0	3,9-9,8	269,8	8	09Г2С, 17Г1С, 18ХМФБ, 20, 30ХГСА, 30ХГМА, 37Г2Ф, 45
	114,0-114,3	12,0-32,0	3,6-9,5	131,7	4	09Г2С, 15Х5М, 17Г1С, 20, 30ХГСА, 37Г2Ф, 40Х
	121,0	12,0-28,0	4,3-10,1	152,6	4	10, 15Х, 17Г1С, 20Х, 30ХГСА, 35, 40Х, 45
	127,0-128,0	13,0-32,0	4,0-9,8	303,4	9	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 20Х, 30ХГСА, 35, 35ХГСА, 37Г2Ф, 45, ДБ
	133,0-133,08	13,0-35,0	3,8-10,2	217,5	6	10, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 17Г1С, 18ХГТ, 20, 30ХГСА, 35, 37Г2Ф, 40Х, 45
	139,7-140,0	14,0-30,0	4,7-10,0	286,1	8	09Г2С, 10, 15ХМ, 17Г1С, 20, 20К, 30ХГСА, 30ХГСН2А, 35
	146,0	16,0-38,7	3,8-9,1	176,2	5	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 20К, 30ХГСА, 35ХГСА, 40Х
	152,0-152,4	16,0-36,0	4,2-9,5	266,0	7	09Г2С, 17Г1С, 20, 30ХГСА, 35, 40Х, 45
	159,0	16,0-34,4	4,6-9,9	270,5	8	09Г2С, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 17Г1С, 20, 35ХГСА
	165,0-168,3	20,0-35,0	4,7-8,4	93,7	3	12Х1МФ, 13ХФА, 15Х1М1Ф, 17Г1С, 20, 32ХА, 37Г2Ф, 45
	178,0-180,0	20,0-45,0	4,0-9,0	84,4	2	20, 30ХГСА, 40Х, 45, ШХ15
	187,7-189,0	16,5-22,6	8,4-11,4	557,6	16	30ХГМА, ДБ
	193,7-194,46	22,0-45,0	4,3-8,8	132,2	4	17Г1С, 30ХГМА, 30ХГСА, 35, 40Х, 45
	203,0	25,0-45,0	4,5-8,1	113,1	3	09Г2С, 10, 17Г1С, 20, 35, 40Х, 45
			3560,7			

Процесс раскатки и калибровки осуществлялся стабильно с допустимым уровнем энергосиловых параметров. Качество получаемых труб удовлетворяет требованиям труб, получаемых по штатной технологии.

Качество поверхности готовых труб, прокатанных на валках с калибровкой по чертежу К-1676018.2 приведено на рис. 1. В сравнении со штатной калибровкой, визуально, качество поверхности улучшилось, уменьшилась глубина винтового следа, особенно на трубах большого диаметра.



Рисунок 1 – Качество поверхности труб размером 178x24 мм, марка стали 20.

В части стойкости и величины износа валков – по раскатному стану максимальный ресурс валков испытать не удалось в связи с малым объемом прокатанных труб, после которого значимого износа входного участка отмечено не было (величина износа до 0,5-1,0 мм).

По калибровочному стану – в конце опытной прокатки 26.10.2018 на двух валках калибровочного стана было замечено выкрашивание по винтовой линии (рис. 2). Оценочная глубина дефекта порядка до 1,0 мм. В дальнейшем после капитального ремонта 06.11.2018 в связи с отсутствием подготовленных валков, цеховыми работниками было принято решение зачистить данные повреждения шлифовальным кругом.

Максимальная величина износа валков калибровочного стана Δ макс. по окончании кампании прокатки (см. рис. 3) составила:

верхнего валка – до 1,5 мм;
левого валка – до 1,0 мм;
правый валок – без износа (шаблон «сел» без зазора).

Фактический ресурс валков (суммарный объем прокатанных труб до износа) составил 3560 т и соизмерим с ресурсом валков со штатной калибровкой КШ-164. Штатные валки меняют раз в месяц и в среднем за этот период прокатывают на калибровочном стане около 4100-4200 т.

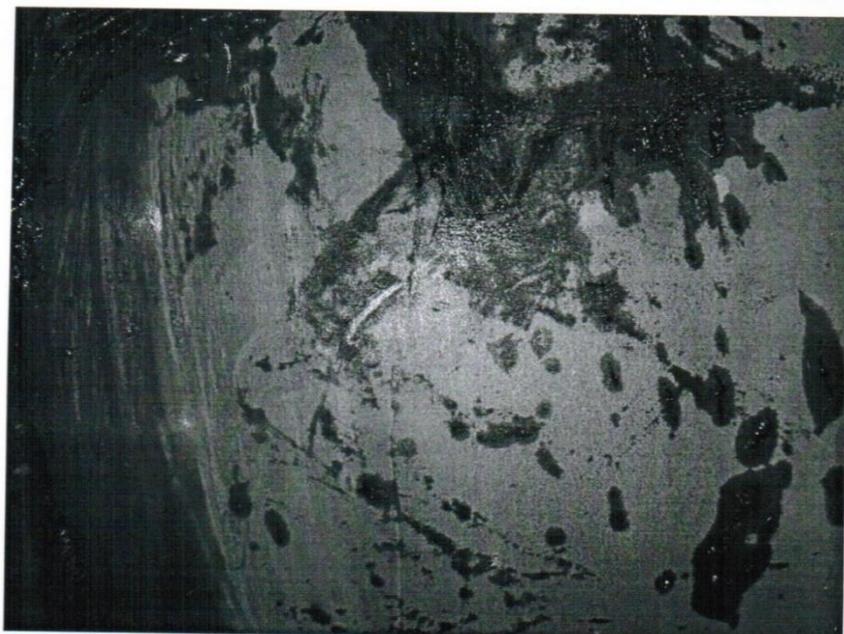
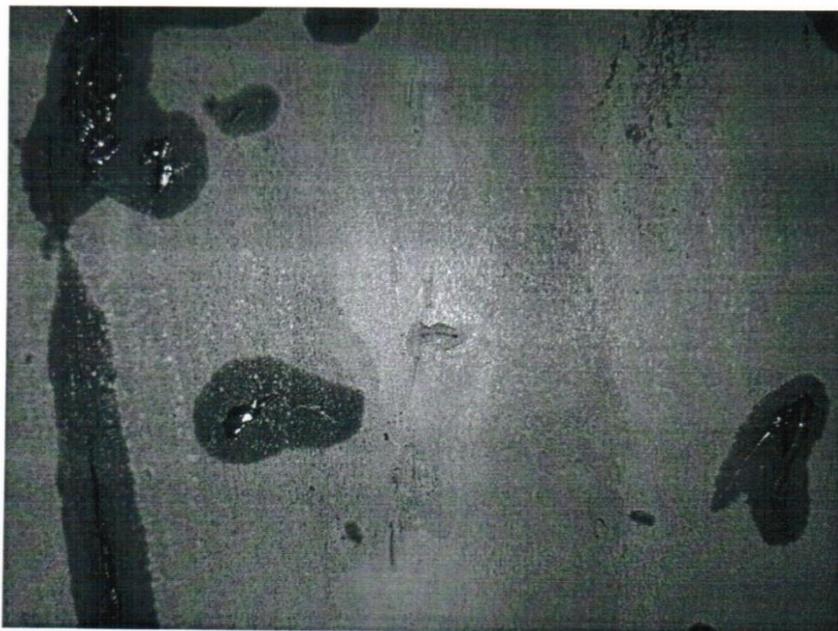


Рисунок 2 – Общий вид выкрашивания валков калибровочного стана

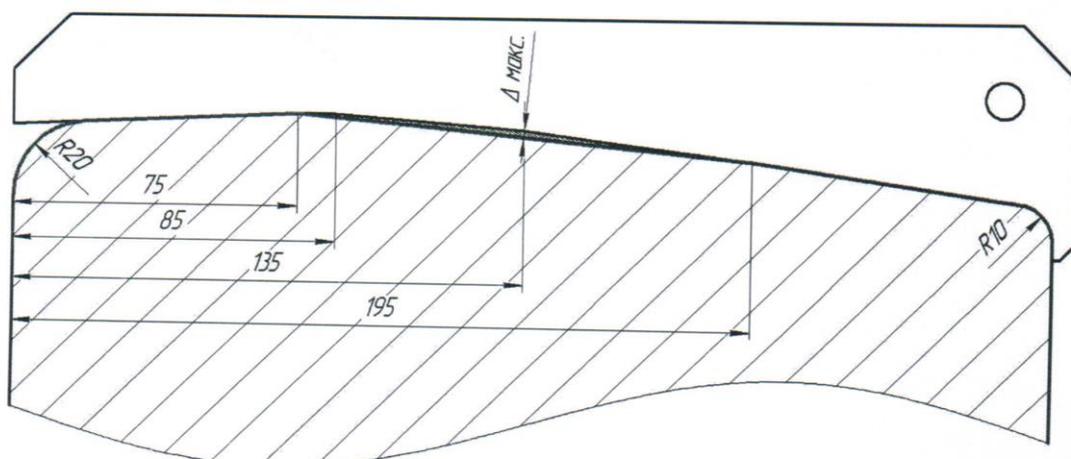


Рисунок 3 – Схема измерения износа валка калибровочного стана.

В части основного (окончательного) вида брака, на образование которого влияет процесс прокатки в калибровочном стане – это гранённость. В таблице 2 приведено количество и размер труб, забракованных по гранённости в период опытно-промышленной эксплуатации валков с калибровкой по чертежу К-1676018.2, в сравнении с кампаниями прокатки на валках со штатной калибровкой (КШ-164) (предыдущий и последующий месяцы).

Таблица 2 – Количество и размер труб, забракованных по гранённости.

Дата	Смена	Размер готовой трубы, мм			Марки стали	Количество брака	
		D	S	D/S		шт.	%
Калибровка валков по черт. К-1676018.2							
09.11.2018	В	89,0	14,0	6,4	40Х	8	15
09.11.2018	С	89,0	10,0	8,9	20	4	9
12.11.2018	А	114,0	12,0	9,5	20	3	6
15.11.2018	А	189,0	17,1	11,1	30ХГМА	8	3
15.11.2018	С	180,0	20,0	9,0	20	1	8
16.11.2018	С	189,0	17,1	11,1	30ХГМА	1	11
						25	
Калибровка валков по черт. КШ-164							
19.09.2018	А	108,0	12,0	9,0	20А	1	4
Калибровка валков по черт. КШ-164							
10.12.2018	А	187,7	18,0	10,4	ДБ	6	3
11.12.2018	В	127,0	14,0	9,1	09Г2С	2	7

Анализируя данные таблицы 2 и ход опытно-промышленных испытаний валков калибровочного стана, можно сделать следующие выводы:

1. Позаказный уровень отбраковки труб по гранённости вырос в среднем в 2 раза в сравнении с кампаниями прокатки на валках со штатной калибровкой (КШ-164).

2. Отбраковка труб зафиксирована в период эксплуатации валков после опытной работы и зачистки повреждений валков шлифовальной машинкой. До опытной прокатки также осуществлялась прокатка труб широкого диапазона по соотношению D/S – от 4,1 до 11,4 (размер 187,7x16,5 мм). Т. е. ручная зачистка дефектов валков внесла значимые изменения в калибровку, которая в свою очередь оказала существенное влияние на процесс прокатки преимущественно тонкостенных труб.

Таким образом, по результатам опытно-промышленных испытаний можно сделать следующее заключение:

- калибровки валков раскатного и калибровочного стана – безусловно, работоспособные и позволяют вести процесс прокатки, как по штатным режимам, так и с увеличением обжатия по диаметру.
- для детальной оценки ресурса работы данных валков требуется повторное проведение испытаний в течение более длительного периода.
- однозначного подтверждения факта влияния калибровки валков К-1676018.2 на увеличение количества отбракованных труб по гранённости не установлено, наиболее вероятной причиной является ручной локальный ремонт валков.
- для увеличения величины обжатия гильзы в раскатном стане требуется изменить участок редуцирования – увеличить его длину и угол конусности.

Рекомендации:

1. Изготовить валки раскатного стана по чертежу Р-1676018.2 с изменённым входным участком.
2. Изготовить валки калибровочного стана по чертежу К-1676018.2 со стальными бочками и их наплавкой износостойкой проволокой.
3. Продолжить испытания валков раскатного и калибровочного стана с калибровками по черт. Р-1676018.2 и К-1676018.2, как по штатным режимам, так и с увеличением обжатия по диаметру.

Начальник ОПТ – главный технолог

Начальник ГТПГТ

Ю.Б. Белокозович

Ю.М. Чернышев

Исхаков Р.В.
тел. 27-20-80