

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

На правах рукописи

НГУЕН КУАНГ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИЗНОСА
ОПРАВОК ПРИ РАСКАТКЕ ГИЛЬЗ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ
СТАЛЕЙ**

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент

Алещенко Александр Сергеевич

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Литературный обзор	7
1.1 Особенности технологии получения бесшовных труб на станах винтовой прокатки	7
1.1.1 Особенности технология ТПА с раскатным станом винтовой прокатки	8
1.1.2 Раскатка труб на станах винтовой прокатки.....	10
1.1.3 Особенность технологии получения труб малого диаметра из коррозионностойких сталей на станах винтовой прокатки.....	14
1.1.4 Особенности схем раскатки труб в двухвалковых станах винтовой прокатки	16
1.2 Износостойкость оправок на двухвалковых станах винтовой прокатки	18
Выводы.....	23
2 Исследование процесса раскатки труб на двухвалковом стане винтовой прокатки МИСиС - 130Д	26
2.1 Планирование эксперимента процесса раскатки труб.....	28
2.2 Компьютерное моделирование процесса раскатки	30
2.3 Влияние технологических факторов на износ оправки	39
2.3.1 Зависимость глубины износа оправки от варьируемых факторов ...	39
2.3.2 Коэффициента вытяжки	40
2.3.3 Угол подачи	45
2.3.4 Влияние коэффициента овализации	46
2.3.5 Взаимосвязи факторов с износом оправки.....	48
2.3.6 Температуры нагрева оправки при раскатке.....	51

2.4 Скольжение металла на контактной поверхности оправки.....	53
Выводы.....	59
3 Исследования процесса раскатки труб из коррозионностойких марок стали на стане МИСиС 130 Д.....	61
3.1 Технология получения бесшовных труб из коррозионностойких сталей на стане МИСиС 130Д.....	61
3.2 Точность геометрических параметров гильз и труб	70
3.3 Качество внутренней поверхности труб.....	73
3.4 Кинематические и энергосиловые параметров.....	78
Выводы.....	85
4. Экспериментальное исследование	87
4.1 Износ оправки при раскатке коррозионностойкой стали 20Х13	87
4.2 Исследование влияния материала оправок на их износ при раскатке труб из стали 20Х13.....	91
4.3 Определение изменения массы оправок.....	105
Выводы.....	111
Заключение	112
Список использованных источников	114

Введение

Связано с развитием сегодняшнего уровня нефтегазовой, машиностроительной отраслей, в ответ на потребности ключевых требований, технических решений при усложняющихся условиях, вызывает значительный рост спроса на высококачественные тонкостенных труб малого диаметра. Одной из попыток решения задач, связанных со значительными затратами на многочисленные операции производства и износом рабочих инструментов из дорогостоящих материалов, являются разработка и освоение производства бесшовных труб из коррозионностойкой сталей на коротких оправках станов винтовой прокатки. Известно, что имеющийся малый ресурс оправок при прокатке бесшовных труб на станах винтовой прокатки приводит к повышенным издержкам, накладывая ограничения на производительность оборудования, ухудшению качества получаемых труб. Однако, вопросы по износу оправок станов винтовой прокатки и влиянию технологических факторов на их стойкость при прокатке труб ещё недостаточно изучены теоретически и экспериментально. Особенно, отсутствуют обобщенные данные по износостойкости при раскатке гильз из высоколегированных сталей на коротких цилиндрических оправках в научно-технической литературе.

В связи с изложенным, исследование износостойкости коротких цилиндрических оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей на станах винтовой прокатки весьма актуально.

Цель работы. Исследование износостойкости коротких оправок и разработка методики расчета износа при раскатке гильз из коррозионностойких сталей.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

- выполнен анализ факторов, определяющих износостойкость рабочего инструмента раскатного стана винтовой прокатки;

- исследовано влияние основных технологических факторов на износостойкость оправок при раскатке гильз на станах винтовой прокатки на основе компьютерного моделирования в программе Qform;
- проведены экспериментальные исследования износа оправок, изготовленных из разных материалов при раскатке гильз из коррозионностойкой стали 20Х13 на опытно-промышленном стане МИСиС - 130Д;
- разработана методика расчета износа оправок, позволяющая прогнозировать время вывода инструмента из эксплуатации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- выявлен характер и уровень влияния основных технологических факторов на износ короткой цилиндрической оправки при раскатке гильз в трубы из коррозионностойких сталей на стане винтовой прокатки МИСиС 130Д: угла подачи, коэффициента вытяжки, коэффициента овализации, углеродного эквивалента материала оправки;
- определены рациональные режимы раскатки труб из коррозионностойких сталей на основе моделирования в программе Qform, обеспечивающие повышение износостойкости оправок;
- экспериментально опробованы раскатные оправки с нанесенным на рабочую поверхность композиционным покрытием методом холодного газодинамического напыления низкого давления, а также получены данные об их износостойкости;
- предложена методика расчета снижения массы раскатной оправки при ее износе с учетом налипания прокатываемого металла, позволяющая прогнозировать время ее вывода из эксплуатации при раскатке гильз из коррозионностойких сталей.

Практическая значимость работы заключается в:

- определении рациональных режимов прокатки и исследовании сталей для изготовления коротких оправок, обеспечивающих высокий ресурс их работоспособности при раскатке гильз из коррозионностойких сталей;

- применении оправок с нанесенными композиционными покрытиями на рабочую поверхность методом холодного газодинамического напыления низкого давления для повышения их ресурса работоспособности;

- разработке методики расчета объема изношенного металла оправок при раскатке труб из коррозионностойкой стали 20Х13, для прогнозирования времени их выхода из эксплуатации;

- рекомендациях по выбору износостойких сталей для изготовления раскатных оправок, обеспечивающих высокое качество внутренней поверхности труб.

Методы исследования. Для исследования износа оправок при раскатке коррозионностойких сталей на двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками выбраны: компьютерное моделирование в специализированной программе Qform 3D и экспериментальная прокатка на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д. В работе использовались современные методы измерения и обработки данных и построения графиков с помощью языков программирования Python и MATLAB; для проектирования геометрических моделей очагов деформации применялись системы AutoCAD, SolidWorks.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы доложены на II-Международной конференции по достижениям в области материаловедения и технологий; Международной научно-технической конференции ISMTMTE 2021.

Публикация. Основное содержание диссертационной работы изложено в 4 статьях, опубликованных в научных журналах, входящих в базы данных Scopus и рекомендованных ВАК РФ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 123 наименования. Работа содержит 126 страниц машинописного текста, 57 рисунков и 14 таблиц.

1 Литературный обзор

1.1 Особенности технологии получения бесшовных труб на станах винтовой прокатки

Известно, что применение стальных бесшовных труб широко встречается в различных отраслях народного хозяйства. В связи с глобальными задачами, стоящими перед промышленностью в условиях рыночной экономики и увеличения спроса на трубы, работающие в агрессивных средах, одной из задач, обозначенных требованием потребителей к трубопрокатному производству, являются расширение сортамента выпускаемых труб, и увеличение высококачественных бесшовных труб из трудно-деформируемых сталей и сплавов, обладающих повышенными механическими и технологическими свойствами. Текущий мировой производственный потенциал трубного производства характеризуется разнообразием технологий их изготовления. Среди прочих становится более распространенной технология производства бесшовных труб, при которой заготовки прошивают и раскатают гильзы в черновые трубы на станах винтовой прокатки [1–28].

В развитие производства стальных горячекатаных бесшовных труб с использованием станов винтовой прокатки внесли вклад разные ученые такие как П. Т. Емельяненко, А.П. Чекмарев, Ю. М. Матвеев, А.И. Целиков, И. М. Павлов, В.С. Смирнов, П.И. Полухин, И. Н. Потапов, В. Н. Выдрин, Я.С. Финкельштейн, П. К. Тетерин, Б. А. Романцев, А.В. Курятников, А. А. Богатов, и др. Ими заложены многие фундаментальные теоретические и экспериментальные разработки, направленные к решению различных технологических вопросов, обеспечивающих получение высококачественных труб, повышению производительности, снижению энергических и экономических расходов.

1.1.1 Особенности технология ТПА с раскатным станом винтовой прокатки

Использование станов винтовой прокатки на технологических линиях производства горячекатаных бесшовных стальных труб малого сортамента таких как прошивка заготовок в полые гильзы и их раскатка в черные трубы обуславливается рядом преимуществ перед иными имеющимися способами прокатки. Особенность данных трубопрокатных агрегатов состоит в том, что формоизменение металла во всех этапах производства труб реализуется винтовой прокаткой. Проведенные ранее работы [3,12] показали, что из общего выпускаемого объема, количество бесшовных труб, полученных на агрегатах с раскатным станом винтовой прокатки, занимает незначительную долю (7...8%).

Одним из важнейших достоинств агрегатов с раскатным станом винтовой прокатки над иными является высокая манёвренность в переходе на прокатку труб нового сортамента труб [1–3,27]. На агрегатах и технологических линиях, в которых раскатка труб производится продольной прокаткой, за 2–3 прохода на автомат-стане, и в 5–9 клетях на непрерывном стане с последующим калиброванием и редуцированием. Очевидно, что при переходе с размера на размер при раскатке труб на данных агрегатах требуется необходимость перевалок, что приводит к созданию дополнительных производственных простоев и снижению эффективности эксплуатации оборудования.

В отличие от вышеперечисленных технологических схем производства труб на агрегатах с раскатным станом винтовой прокатки переход на прокатку труб разных типоразмеров достигается изменением положения рабочих валков, а их толщина стенки подается соответствующим подбором диаметра оправки. Высокая маневренность в перестройке станов позволяет снизить отходы металла при дальнейшей механической обработке за счёт уменьшения припусков на обточку труб [1,27].

Сравнительный анализ различных технологических схем агрегатов, существующих в производстве горячекатаных бесшовных труб показывает, что агрегаты с раскатным станом винтовой прокатки позволяют получить горячекатаные трубы с более высокой точностью геометрических размеров [29].

Вопросы о точности геометрических размеров труб, выпускаемых на станах винтовой прокатки рассмотрены в немногочисленных работах [2,24,30–35]. Авторы работы [35] проводили сравнение поперечной разностенности труб, полученных на агрегатах с различными способами раскатки гильз. Было установлено, что поперечное отклонение толщины стенки получаемых труб является наименьшим полученным при раскате на станах винтовой прокатки, обычно не превышает 7–8 % [1]. Вклад в исследование точности полых гильз и черных труб также внесли М.Ф. Столетний и Е.Д Клемперт [35]. Проведенные ими работы объясняют причину появления поперечной разностенности труб. При винтовой прокатке разностенность прокатываемых полых заготовок имеет винтовой характер расположения по длине трубы в результате скручивания прокатываемого металла с оправкой [1]. По мнению М.Ф. Столетнего и Е.Д Клемперта на точность гильз и труб влияют факторы, относящиеся к технологическим параметрам, связанным с настройкой стана и калибровкой инструментов. Состояние поверхности и точность геометрических размеров полученных черновых труб в зависимости от технологических факторов также исследованы в работе [24]. Показано, что точность полученных гильз и труб является результатом рациональной настройки технологических параметров процессов прокатки, таких как межвалковое расстояние, угол подачи, коэффициент овализации и обжатие по толщине стенки, а также изменением калибровки технологического инструмента.

Упомянутые выше достоинства являются важным фактором, которыми объясняется особое внимание различных ученых и производителей, к раскатке труб на станах винтовой прокатки. Внедрение и применение

трубопрокатных агрегатов на базе винтовой прокатки весьма актуально для получения труб малого диаметра из высоколегированных сталей, применяемых в машиностроении и энергетической промышленности, которые позволяют минимизировать отходы на стружку за счет неизбежных подготовительных операций при дальнейшей механической обработке в холодном состоянии. В работе [36] перечислены автором различные технологические схемы получения бесшовных труб с использованием раскатных станов винтовой прокатки в Российской, а также зарубежной практике, которые были введены и внедрены в трубопрокатное производство в промышленном масштабе.

1.1.2 Раскатка труб на станах винтовой прокатки

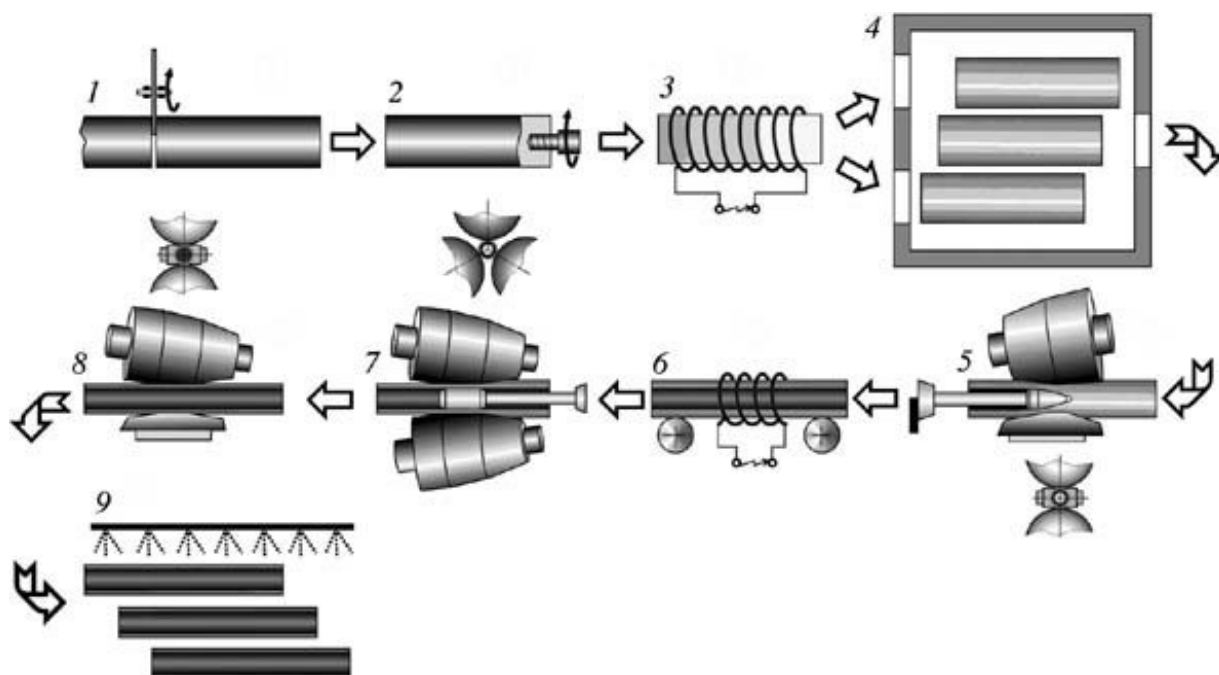
Среди агрегатов, применяемых в производстве бесшовных труб, где раскатку гильз в трубы производят на станах винтовой прокатки существуют две технологических схемы. Наиболее распространёнными из них являются агрегаты с раскаткой на трёхвалковых станах [1,26]. В меньшей известности и масштабах производства станут агрегаты с двухвалковыми станами с направляющим инструментом разного вида.

Сегодняшнее производство горячекатаных бесшовных труб повышенной точности для машиностроительной промышленности с последующей механической обработкой производится в основном на агрегатах с трехвалковым раскатным станом. Производственная практика показывает, что на данных трубопрокатных агрегатах выпускают трубы диаметром от 50 до 250 мм [19,24]. Технологическая особенность агрегатов с использованием раскатного трехвалкового стана позволяет получать толстостенные трубы из углеродистых и легированных сталей с отношением диаметра к толщине стенки $D_t/St \leq 11 - 12$.

Ограничение при получении труб малого диаметра и тонкостенных труб с $\frac{D_t}{St} > 12$ сужает область применения агрегатов с трехвалковым станом

винтовой прокатки в промышленности. Вопросы получения труб малого диаметра могут решены внедрением редуцированных станов в агрегатах [33,37,38]. Однако наличие редуцированных станов снижает точность и маневренность агрегатов. Также известен способ винтовой прокатки на трехвалковом стане [10], который обеспечивает производство труб с отношением диаметра к толщине стенки в переделе 18–25. Разработан учеными кафедры обработки металлов давлением (ОМД), НИТУ «МИСиС» способ получения труб диаметром 40–80 мм на агрегате с трехвалковым раскатным станом без применения редуцированного стана (рисунок 1.1). Мини ТПА 40–80 был внедрен на Южно-Корейском предприятии компании «Sechang Steel Co., Ltd» с целью производства труб диаметром 40-80 мм с отношением $D/S < 9$, длиной до 6 м. Краткое описание агрегата изложено в некоторых работах А. Б Романцева с его соавторами [19,26,39]. В технологический процесс входят прошивка заготовки с последующей раскаткой труб и калибрование на станах винтовой прокатки (рис 2). Результат эксплуатации разработанного агрегата дает положительную результат по геометрическим размерам труб, который достигнут за счёт внедренных технологических приемов и конструкции оборудования [19,26,39]. По данным зарубежной практики, получили распространение в меньшей популярности трубопрокатные агрегаты с двухвалковым станом Дишера. Агрегаты со станом Дишера [40–44] позволяют получать тонкостенные трубы с отношением $\frac{D_t}{S_t} \leq 25$, точность которых не ниже, чем на трехвалковых станах. Диаметр полученных труб находится в переделе 38...114 мм с толщиной стенки от 2 до 12 мм, длина которых от 6 м 12 м [1].

Однако существуют различия в кинематике процесса, так и в функции направляющего инструмента между современными прошивными станами с дисками и раскатными станами Дишера. Из-за сложной своей конструкции, длительности и трудность в перестройке дисков при переходе на прокатку труб другого типоразмера, высокого энергопотребления и недостатки в расположении валков, станы Дишера мало распространены.



1- порезка заготовок; 2-зацентрировка заготовок; 3 –нагрев в индукционной печи; 4 – термостатирование; 5 – прошивка заготовок; 6 – подогрев гильз; 7 – Раскатка гильз в черновые трубы; 8 – калибровка труб; 9 – контролируемое охлаждение

Рисунок 1.1 - Схема технологического процесса производства труб на ТПА 40–80 [39]

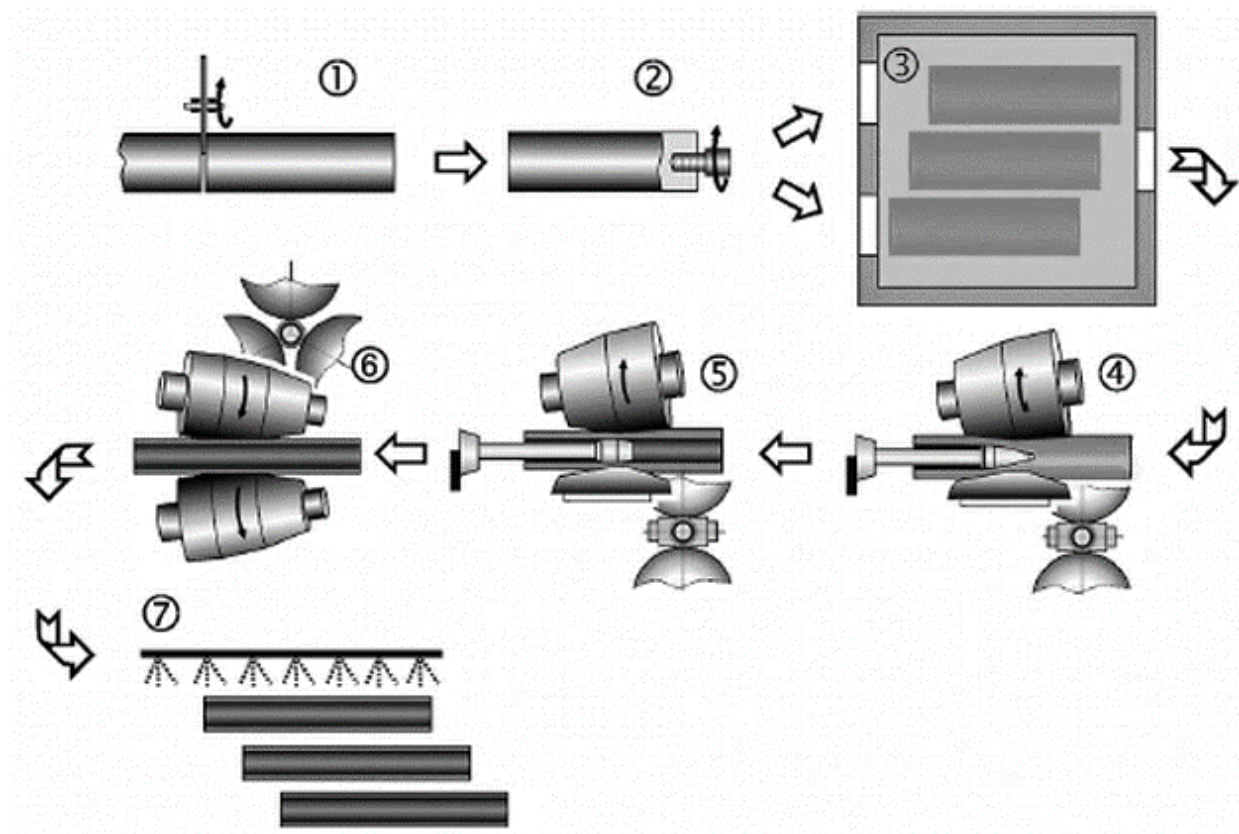
Недостатки станов Дишера решены новой конструкцией стана винтовой прокатки, в качестве направляющего инструмента которого применяется диск-сектор вместо габаритных дисков [45]. Конструкция нового стана разработана под руководством Б. А. Романцева на кафедре «ОМД, НИТУ «МИСиС», результаты прокатки в лабораторных условиях показали свою работоспособность и существенные технологические и конструктивные преимущества. Применение стана такого типа с направляющим инструментом позволяет устранять ряд конструктивных недостатков с сохранением преимуществ свойственным дискам, и возможность применять линейки в качестве направляющего инструмента нового разработанного стана. В работе [7] изложен способ прокатки тонкостенных горячекатаных особо точных труб

с отношением $D/S = 13...22$ в двухвалковом стане винтовой прокатки на длинной плавающей оправке с направляющими линейками. Показано, что разностенность полученных труб находилась в пределах 6... 12 %, что соответствует точности труб с отношением $D/S < 12$ на трехвалковом раскатном стане.

Необходимость усовершенствования процессов получения бесшовных труб, и снижение затрат на производство и себестоимости требует технологические схемы, которые обеспечивают высокое качество получаемых продукции, и мобильность в переходе на прокатку труб нового типоразмера. В ходе модернизации и усовершенствования существующих технологий были запатентованы Советскими и Российскими учеными в последнее время способы изготовления труб винтовой прокаткой, при которых получение бесшовных труб прошивкой и раскаткой осуществляется на одном стане винтовой прокатки [20,25,46–49]. Которые позволяют получить высококачественные горячекатаные бесшовные трубы широкого сортамента с высокой точностью по геометрическим размерам по сравнению с присутствующими технологиями с уменьшением энергозатрат и более простой конструкцией стана [20,25,49].

В основу технологического процесса входит способ получения бесшовных труб, включающий две стадии- прошивка - раскатка в одной зоне деформации двухвалкового стана винтовой прокатки с направляющими линейками. К примеру, в рамках внедрения новой технологии введен в эксплуатацию ТПА 70–270 (рисунок 1.2) по производству горячекатаных труб для обсадных и насосно-компрессорных соединений [49–51].

Характерные особенности предложенной технологии процессов винтовой прокатки для получения бесшовных труб с повышенной точности на ТПА 70–270 исследованы и опубликованы в некоторых работах [23,34,46,47,52–55]. Особенность агрегата позволяет существенно снизить габаритную массу оборудования и расходы на его изготовление, при этом не уменьшая качество получаемых труб.



1- порезка заготовки; 2-зацентровка; 3 –нагрев в печи; 4 – прошивка заготовок на двухвалковом стане с направляющим линейками; 5 – Раскатка гильз на короткой оправке; 6 – калибровка на трехвалковом стане винтовой прокатки; 7 – контролируемое охлаждение

Рисунок 1.2 - Технологическая схема ТПА 70–270 [52]

1.1.3 Особенность технологии получения труб малого диаметра из коррозионностойких сталей на станах винтовой прокатки

Трубы из высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов используются в ряде отраслей промышленности. Жаропрочные сплавы и коррозионностойкие стали характеризуются высоким сопротивлением деформации, низкой технологической пластичностью, узким диапазоном температур деформации и высокой адгезией к технологическому инструменту

[1–6]. Для производства горячекатаных труб из высоколегированных сталей и сплавов обычно используется технология с низкой производительностью, большим количеством технологических операций, высокой металлоемкостью и трудоемкостью, что приводит к большим затратам и увеличению себестоимости [56]. Одним из направлений в решении вышеизложенной проблемы при производстве труб малого диаметра из высоколегированных конструкционных и коррозионностойких сталей является разработка и внедрение принципиально новых технологических процессов на основе винтовой прокатки.

Как отмечалось выше, исследовательским коллективом кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС» разработана новая технология получения высококачественных бесшовных труб из коррозионностойких марок сталей и сплавов с широким сортаментом [20,25]. В её технологическую схему включен: нагрев заготовки, прошивка заготовки в гильзы и последующая раскатка в трубы на оправочном стержне.

Однако возникающая при эксплуатации данной технологии проблема низкой стойкости прошивных коротких оправок, обусловленная силовыми и тепловыми условиями, требует проведения глубоких исследований. В отличие от длинных оправок, используемых в технологических линиях других агрегатов, короткие цилиндрические оправки на станах винтовой прокатки имеют малый ресурс. Пробные эксперименты показывают, что при прокатке труб малого диаметра (менее 100 мм) как правило наблюдается повышенный износ прошивных и раскатных оправок. Результаты работ, проведенных исследовательским коллективом под руководством Б. А. Романцева [39,49] показали, что после прокатки 30–35 шт. труб длиной 5 м оправки малого диаметра подвергаются большому износу с уменьшением диаметра. Данная особенность приводит к снижению производительности производства, точности получаемых труб и также ухудшению качества их внутренней поверхности, вызванного износом рабочей поверхности оправок.

1.1.4 Особенности схем раскатки труб в двухвалковых станах винтовой прокатки

Для достижения приемлемых экономической и технологических целей при производстве точных тонкостенных труб с высоким качеством поверхностей процесс раскатки целесообразно осуществлять в двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками на короткой цилиндрической оправке, укрепленной на стержне. Процесс раскатки на оправочном стержне по типу оправок можно разделить:

- раскатка на короткой конической оправке;
- раскатка на оправку с обратной конусностью;
- раскатка на короткой цилиндрической оправке, удерживаемой стержнем, работающим на растяжение;
- раскатка на короткой цилиндрической оправке, удерживаемой стержнем, работающим на сжатие.

Наиболее универсальным способом является раскатка на конической оправке. Применение которой, дает гибкие технологические возможности получения труб разных типоразмеров за счет изменения положения оправки в очаге деформации. Однако применение таких оправок при раскатке труб ограничивает получить длинные трубы за счет удерживания оправок стержнем, работающим на сжатие. Кроме того, к недостаткам в применении оправок такого типа относятся интенсивный локальный износ, который снижает их рабочий ресурс без остановки стана, внесение корректировки в настройку, и получение углубленной винтовой линии на поверхностях трубы с большой вероятностью. Кроме этого, при применении данных оправок усложняется настройка стана для получения труб с заданными толщиной стенки и диаметром.

Процесс раскатки гильз в трубы на оправке с обратной конусностью в основном применяется для оправочного редуцирования с утонением стенки. Применение раскатной оправки такого типа калибровки позволяет уменьшать

наружный диаметр гильз и получать черновые трубы диаметром на 10...20% меньше исходного. Особенности их калибровки при раскатке труб описан подробно в работе [24]. К минусам использования данных оправок при раскатке труб относятся износ оправок, сказывающийся на появление дефектов на внутренней поверхности из-за неуправляемого изменения деформационных параметров процесса, и также трудоемкости в перестройке стана из-за износа инструментов.

Наиболее простым в эксплуатации считается процесс раскатки гильз в трубы на короткой цилиндрической оправке. Калибровка оправок данного типа дает возможность получения труб заданной толщины стенки, увеличения их рабочего ресурса, коэффициента осевой скорости, что позволяет повысить качество внутренней поверхности горячекатаных труб. Однако применение оправок данного типа встречается в прокатке с уменьшением диаметра гильз на 10...15% [24]. Особенность калибровки оправок данного типа дает возможность осуществление редуцирования гильз с обжатием по стенке на входном участке валков до пережима и выглаживать стенку трубы в очаге деформации

Применение оправок данного типа возможно разделить по двум схемам в зависимости от особенности работы оправочного стержня, которым удерживается оправка. При раскатке на удерживаемой оправке на стержне, работающем на сжатие, устойчивость стержня с оправкой в очаге деформации является фактором, оказывающим влияние на качество и разностенность получаемых труб. Данную схему возможно рекомендовать к применению при раскатке коротких труб.

Применение удерживаемой оправки на стержне, работающем на растяжение, не сталкивается с подобной проблемой. Однако, возникающей проблемой при раскатке на оправке со установленным стержнем, работающим на растяжение, является высокая трудоемкость и длительность подготовки к работе раскатного стана, что в результате может приводить к снижению производительности агрегата.

1.2 Износостойкость оправок на двухвалковых станах винтовой прокатки

На двухвалковых станах винтовой прокатки формоизменение заготовок реализуется в очаге деформации, образованном взаиморасположением под углом подачи бочковидных валков, расположенной между ними оправки и направляющих инструмента при высоких температурах [1–3,12,16,57].

Известно, что интенсивный износ рабочей поверхности является основной причиной повреждения и замены рабочих инструментов станов винтовой прокатки, который непосредственно негативно влияет на константность процессов прокатки, качество поверхности и годность выпускаемых труб, и также технико-экономические показатели эксплуатации агрегатов [58].

Оправки являются ответственным технологическим инструментом станов, который отвечает за режимы деформации, стабильность процесса и также качество, стоимость выпускаемых труб. Повышение износостойкости оправок станет одной из самых актуальных проблем трубной промышленности.

Вопросы условий эксплуатационной работы оправок станов винтовой прокатки освещены в многочисленных научно-технических трудах [40,41,58–81]. Производственный опыт и литературные данные показывают, что на стойкость, долговечность прошивных оправок оказывает влияние рядов факторов: материал и способ изготовления оправок, виды термической обработки, материала прокатываемых заготовок, форма и конструкция оправок, режимы прокатки, настройка станов и другие.

При прокатке труб основная деформация металла осуществляется в зоне, образованной валками и расположенной между ними оправкой. Во время своей эксплуатации оправки периодически подвергаются длительному жесткому воздействию больших давлений с высоким термическим

напряжением при быстром перепаде температуры за счет быстрого нагрева рабочей поверхности при прокатке и последующем охлаждении. В результате чего приводит к интенсивному износу рабочей поверхности оправок из-за пластической деформации поверхностных слоев металла оправок при воздействии больших нагрузок на контактной поверхности с горячим металлом прокатываемой заготовки. Утверждено в работах [59,61], что в процессе прокатки на станах винтовой прокатки рабочая поверхность оправок разогревается до температуры от 700°С до 900 °С за счет циклического контакта с высокотемпературным металлом заготовки.

Воздействие термических напряжений циклического характера, вызывающихся нагревом до высокой температуры в процессе прокатки и после него резким охлаждением в паузах между проходами, приводит к образованию на оправке прошивного стана трещин в виде разгарной сетки. Теплое и термонапряженное состояние водоохлаждаемых оправок при прошивке легированных сталей детально исследовано авторами в работах [59,75,78,79,81–83]. Представленные результаты показали, что ключевым фактором, определяющим стойкость оправок оказывается степень температуры разогрева и ее распределение по всему объему оправок. Также установлено, что значительным влиянием на тепловое состояние служит материал прокатываемой заготовки, длительность прокатки, материала оправок, условия снижения температуры оправок в паузах между проходами режимов прокатки, и настройки стана.

Анализ полученных данных экспериментов, проведенных в работе [79] показал, что прошивка высоколегированных сталей приводит к увеличению температуры, что обусловлено деформационным разогревом на поверхности оправок. Который непосредственно снижает твердость материала оправок, что сопровождается более интенсивным износом.

Из-за сложности при решении различных термопластичных, кинематических уравнений в процессе прокатки исследование влияния режимов работы оправок станов винтовой прокатки на их стойкости

теоретическим путем затруднено. Авторы работ [78,79,82,84], в результате проведенных экспериментальных исследований, выяснили зависимости стойкости прошивных оправок от их формы и режимов прокатки. Представленные результаты показали, что в большой степени на стойкость оправок влияет их форма. Также установлено авторами, что увеличение длительности за счет уменьшения осевого скольжения прокатываемого металла при прокатке, приводит к увеличению температуры разогрева поверхности оправок.

Практикой производства и анализом данных технико-литературных произведений [59,65,83,85] показано, что основными видами износа оправок являются изнашивание поверхности, налипание деформируемого металла на оправку, задиры поверхностных слоев металла оправки и др. При прошивке заготовок в гильзы и их раскатке в трубы, в очаге деформации, образованном между валками и размещенной между ними оправкой формируются термодформационные условия, при которых осуществляются схватывание и сваривание деформируемого металла с металлом оправки.

Сегодня особое внимание уделяется вопросам, связанным с повышением износостойкости оправок станов винтовой прокатки. Были предложены в разных работах [41,60,65–67,69,71,75,83,85–99] решения, направленные на устранение вышеупомянутых видов износа прошивных оправок при прокатке разных заготовок, и увлечения их ресурса работы.

К первой группе относятся методы, связанным с улучшением технологического процесса, выбором материала и способом изготовления оправок [60].

В связи с вышесказанным, на долговечность прошивных оправок влияют габаритные размеры заготовок, режим прокатки, настройка стана. Обеспечить перераспределение действующих напряжений и снизить изнашивание инструментов пластической деформацией на их поверхность возможно оптимизацией параметров режимов прокатки [65]. В значительной степени качество выпускаемых труб зависит от конструкции, формы, и

геометрических размеров оправок. Характерная особенность калибровки оправок определяет уровень удельных усилий, действующих на контактной поверхности инструмента с металлом, и сказывается влияние на его стойкость [41,80,94].

По словам авторов работ [60,61] для повышения ресурса работы прошивных оправок требуется обеспечения температурного режима работы в избежание их перегрева. Распространённым решением в производстве стало применение водоохлаждаемых изнутри оправок, однако оправки с такой конструкцией не допускаются при прокатке коррозионностойких сталей из-за попадания на поверхность гильзы воды, что приводит к образованию на нее внутренних дефектов.

Использование технологических смазок также позволяет повысить износостойкость прошивных оправок, и эффективность прокатки. Применение смазок при прокатке позволяет облегчить течения металла, изоляцию от термических напряжений, избежание от налипания на оправки прокатываемого металла [88,100,101].

Одним из важнейших характеристик при выборе материала для изготовления оправки станет низкая свариваемость. Из практики сварки, известно, что свариваемость зависит от углеродного эквивалента избранного материала, определяемого химическим составом [67,96]. В качестве материала оправок для обеспечения высокой износостойкости, термостойкости, низкой склонности к свариванию широкое применение получили конструкционные легированные стали марок 20ХН4ФА, 25ХН3А, 20ХН8, 12ХН3А, 35ХН2Ф, 40Г2Ф, 40ХСМФ и другие [67,84]; так и молибденовые сплавы (TZM и TZC), жаропрочные сплавы на никелевой и кобальтовой основах (ЭИ-437Б и ЭП131) [59,67,75,78].

Как отмечалось из предшествующего изложения, стойкость оправок в большой степени зависит от способа их изготовления [83]. Оправки возможно изготовить литьем, точением из кованых заготовок, проката, и заковкой патрубков. Однако, наиболее высоким рабочим ресурсом обладают оправки,

изготовленные горячей штамповкой. Кроме того, рециклинг бывших в употреблении изношенных штампованных оправок, можно повторной штамповкой и механической обработкой на меньший диаметр [86].

Для повышения износостойкости прошивных оправок также проводили различные мероприятия, связанные со способами их упрочнения. Для обеспечения высокой твердости и наличия оксидного слоя на поверхности оправки подвергают термообработке (нормализации и отпуску) [69]. Образование оксидных слоев на поверхности оправок термическим оксидированием, и влияние оксидного слоя окалина на износостойкость оправок исследованы в некоторых публикациях [69,89,96,99,102–104]. Оксидный слой, состоящий из двух зон, включающих оксиды Fe_2O_3 и Fe_3O_4 с различным соотношением на поверхности создает дополнительное сопротивление к температурной передаче, которое зависит от толщины слоя, химического состава и их теплофизических свойств. Результат исследования [96] показал, что растягивающие внутренние напряжения и низкая твердость изготовленных оправок, также нехватка в них специальных легирующих металлов, отсутствие FeO в функциональном слое вызывают снижение стойкости оправок. Однако, из литературных данных [58,59] известно, что согласно диаграмме состояния железо-кислорода, температура разогрева на поверхности оправок соответствует температурам существования FeO . В результате при эксплуатации поверхность оправок покрывается оксидным слоем, состоящим из трех зон. По словам авторов работы [69,104], что увеличение проходов прокатки может привести к утолщению оксидного слоя и изменению его фазового состава за счет диффузии легирующих элементов в прослойки между оксидными слоями, что способствует усилению их сцепления. Кроме чего, образуемые оксидные слои служат в качестве смазочного материала. Производственной практикой показано, что оптимальная толщина оксидного слоя для обеспечения вышесказанных функций, которая не оказывает абразивное воздействие на оправку, находится в интервале от 400 мкм до 600 мкм.

Из практики и литературных источников известно, что наиболее результативным способом повышения рабочего ресурса прошивных оправок является изготовление их из целиком из жаропрочных сплавов [58,67], или с применением наплавки тугоплавких сплавов и композитов [90,92,93,95,97,98,105,106] на рабочую поверхность. Известен способ повышения стойкости оправок с применением новой конструкции оправки из жаропрочного сплава с присоединением носка оправки [60]. Авторами работы [67] проведен сравнительный анализ оправок, изготовленных из разных видов материала. Установлено, что оправки из молибденовых сплавов и с керамическим покрытием обладают наиболее высокой стойкостью по сравнению с оправкой с наплавленными или присоединенными иным способом носком и оправкой из конструкционных сталей в 1,5 до 2 раза. Однако, их себестоимость многократно превышает остальные оправки из-за дорогостоящего материала.

Как отмечалось выше, износ инструмента для производства бесшовных труб винтовой прокаткой рассмотрен во многих научных работах российскими и зарубежными учеными. Однако, несмотря на достаточное количество проведенных исследований, в которых рассматривались стойкости оправок при прошивке на стане винтовой прокатки и методы увеличения их длительности службы, вопросы износа оправок, используемых при раскатке гильз в трубы на станах винтовой прокатки ещё недостаточно изучены теоретически и экспериментально. Исходя из этого, требуется проведение глубоких исследований особенностей износостойкости оправок, применяемых на станах винтовой прокатки, в частности для раскатки в трубы малого диаметра из коррозионностойких сталей и сплавов, и влияний на неё технологических факторов процесса.

Выводы

Научно-технический обзор, на основе литературы и публикаций по технологии получения горячекатаных бесшовных труб малого диаметра из коррозионностойких сталей на станах винтовой прокатки и износостойкости рабочих инструментов позволит сделать следующие выводы:

1. Получению бесшовных труб на станах винтовой прокатки посвящено многочисленное количество проведенных научных трудов. Особенности технологии позволяют получать трубы с высоким качеством по геометрическим размерам, и манёвренностью при переходе на прокатку трубной продукции другого типоразмера.

2. Увеличение спроса высококачественных тонкостенных труб малого диаметра из коррозионностойких сталей вызывает необходимость разработки и введения в практику новой технологической схемы получения бесшовных труб на станах винтовой прокатки с обеспечением высокой точности, простотой конструкции стана и минимизацией затрат. Данный вопрос решен применением новой технологической схемы прокатки на в двухвалковых станах винтовой прокатки с направляющими линейками. Практика прокатки труб из коррозионностойких сталей по новой технологической схеме показала, что особое внимание было уделено износу оправки и направляющих линеек.

3. Вопросы износа инструментов станов винтовой прокатки освещены в многочисленных работах. Установлено, что износостойкость технологических инструментов, в частности оправок имеет сложный характер в зависимости от ряда технологических факторов, материала и способа их изготовления и термообработки.

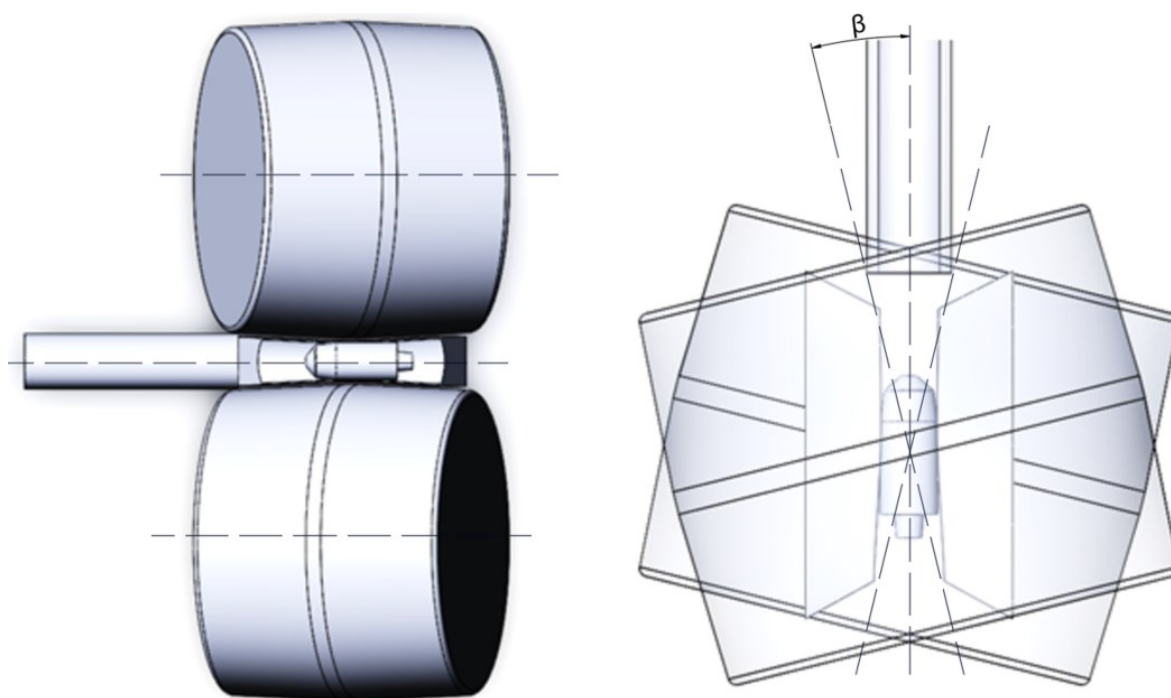
4. Производственная практика показала, что изношенное состояние оправок может привести образованию неустраняемых дефектов способами последующей механической обработки на поверхности труб, что непосредственно снижает производительность процесса и увеличивает себестоимость производства, это вызывает особый интерес, направленный на исследование, и разработку методов повышения их стойкости.

5. Вопросу повышения ресурса работоспособности оправок прошивного стана посвящено много исследований. Однако исследование износостойкости оправок, применяемых при раскатке труб практически не изучено и требует проведения необходимых исследований, направленных на выбор наиболее рациональных режимов прокатки, материалов применяемых оправок и их методов изготовления, обеспечивая их высокую износостойкость и при этом не снижая качество выпускаемых труб.

2 Исследование процесса раскатки труб на двухвалковом стане винтовой прокатки МИСиС - 130Д

В производстве бесшовных труб процесс раскатки в основном аналогичен прошивке. В ходе проведения исследований по разработке технологии получения труб широкого сортамента из коррозионностойких сталей на стане МИСиС-130Д рассмотрена раскатка гильз в трубы без изменения очага деформации с размещенной на стержне короткой цилиндрической оправкой. Исследование условий деформации при раскатке гильз в трубы на стане с бочковидными валками представляет интерес для разработки рационального режима прокатки с целью повышения износостойкости инструмента, в частности оправок, при этом не снижая качество получаемых после раскатки труб. Особое внимание необходимо уделить влиянию кинематических и деформационных режимов на течение металла и характер износа раскатных оправок. Согласно упомянутой в первой главе информации, для повышения экономической эффективности процесс раскатки гильз в трубы целесообразно применять в двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками для изготовления высококачественных тонкостенных труб высокой точности. Раскатка в трубы в двухвалковом стане в отличие от распространенных схем в других станах винтовой прокатки, имеет более универсальное формоизменение металла и широкий варьированный диапазон технологических параметров процесса, в том числе угла подачи и коэффициента вытяжки.

В состав лабораторного оборудования кафедры ОМД, расположенного в учебно-научно-производственной базе НИТУ «МИСиС» входит двухвалковый стан винтовой прокатки МИСиС-130Д. Очаг деформации данного стана образуется двумя бочковидными валками, направляющими линейками и расположенной между ними короткой оправкой (рисунок 2.1).



1,2 – направляющие линейки; 3,4 – рабочие валки; 5 цилиндрическая оправка.

Рисунок 2.1 - Очаг деформации при раскатке труб в стане МИСиС-130Д

Известно, что форма оправки, углы конусности и угол подачи, а также установка валков и оправки являются основными параметрами, которые определяют размеры и качество конечной трубы. Ранее проведенное исследование процесса получения тонкостенных горячекатаных бесшовных труб, раскатанных на опытно промышленном стане МИСиС-130Д [24] показало, что дефектов наружной и внутренней поверхности опробованных труб из сталей различных марок с отношением D_T/S_T от 7 до 13 не выявлено. В роли существенных технологических параметров, оказывающих влияние на стойкость оправки, рассматривались: угол подачи, коэффициент овализации, коэффициент вытяжки. В ходе исследований установлено, что повышать срок службы оправок при этом не снижая качество и точность получаемых труб возможно варьированием обжатия в пережиме рабочих валков, расстояния между направляющими линейками, коэффициента вытяжки деформации при различных маршрутах прокатки.

Основным фактором процесса винтовой прокатки является угол подачи валков, который определяет количество циклов деформации в очаге, совершенных во время контакта с поверхностью оправки. Величина которого как ранее уже отмечалось в первой главе непосредственно влияет на стойкость оправок. Показано экспериментальной практикой что, процесс прокатки на стане МИСиС-130Д при углах подачи от 10 до 14° происходит наиболее стабильно, и обеспечивает высокое качество состояния поверхности и точность геометрических параметров получаемых труб.

Также известно, что одной из основных характеристик при настройке очага деформации, оказывающей влияние на формоизменения металла в двухвалковом стане винтовой прокатки, и точность получаемых труб является коэффициент овализации ξ .

В работе [107] показана зависимость коэффициента овализации от многих факторов, рациональное значение которого находится в пределах 1,06...1,18. При меньших значениях коэффициента овализации не выполняется условие первичного захвата. Уменьшение коэффициента овализации также вызывает снижение скорости прокатки и повышает скольжение металла (снижение коэффициента осевой и тангенциальной скоростей) относительно инструмента в очаге деформации. С другой стороны, увеличение коэффициента овализации ведет к некоторому возрастанию коэффициентов осевой и тангенциальной скоростей.

2.1 Планирование эксперимента процесса раскатки труб

Целью эксперимента является определение основных факторов, влияющих на процесс раскатки на стане МИСиС - 130Д. Наиболее варьируемыми технологическими факторами в производственных условиях являются угол подачи рабочих валков, коэффициент вытяжки, а также коэффициент овализации очага деформации.

Учитывая технические характеристики стана и условие прокатки, основные технологические факторы и пределы их варьирования представлены в таблице 2.1.

На основе метода экспериментального планирования разработана матрица с 8 вариантами для проведения моделирования.

Таблица 2.1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Уровни варьирования		
	-1	0	1
Угол подачи (X_1)	10	12	14
Коэффициент вытяжки (X_2)	1,52	1,68	1,84
Коэффициент овализации (X_3)	1,08	1,12	1,16

На стане винтовой прокатки МИСиС-130Д проведены опытные раскатки гильз в трубы при варьировании угла подачи от 10° до 14° и коэффициента овализации от 1,12 до 1,16 за счёт изменения расстояния между направляющими линейками на цилиндрической оправке диаметром 50 мм.

В рамках исследования влияния вышеперечисленных факторов прокатки на стойкость цилиндрической оправки диаметром 50 мм проводили моделирование процесса раскатки гильз диаметром 73 мм со стенкой 8...10 мм в трубы размерами $D \times S = 63 \times 6$ мм из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т при одинаковом расстоянии между валками с обжатием заготовки в пережиме $U_{\text{п}} = 14 \%$, при углах подачи $10...14^\circ$.

Коэффициент овализации в зависимости от расстояния между линейками варьируется в диапазоне 1,08 и 1,16. Объектом исследования являлась глубина износа короткой цилиндрической оправки. Варианты для моделирования представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Варианты моделирования

Варианты	Размеры гильзы, мм	Угол подачи, градус	Коэффициент вытяжки	Коэффициент овализации
1	73x10	14	1,68	1,16
2	73x10	10	1,68	1,16
3	73x8	14	1,54	1,16
4	73x8	10	1,54	1,16
5	73x10	14	1,68	1,08
6	73x10	10	1,68	1,08
7	73x8	14	1,54	1,08
8	73x8	10	1,54	1,08

2.2 Компьютерное моделирование процесса раскатки

Процесс раскатки труб представляет собой сложную операцию, при которой материал подвергается интенсивной пластической деформации, а также скручиванию поверхности, что приводит к деформациям сдвига. Кроме того, во время процесса возникают экстремальные условия трения при высокой температуре, что увеличивает сложность самого процесса и его решения в виде нелинейных термопластичных уравнений.

С развитием компьютеров и программного обеспечения появились новые численные модели процессов обработки металлов давлением, в частности прокатки труб на станах винтовой прокатки. Эти новые модели основаны на методе конечных элементов (МКЭ). Суть метода конечных элементов сочетает в себе численный метод решения уравнений в частных производных переменными. На сегодняшний день универсальным методом для облегчения в изучении и исследовании процессов, и решения различных пластических задач обработки металлов давлением без проведенных необходимых дорогостоящих экспериментов является МКЭ. Применение МКЭ для решения задач обработки металлов давлением позволяет

пользователем объективно изучать процессы деформации с высокой точностью.

В последние годы попытались смоделировать процессы прокатки труб в условиях трехмерного деформированного состояния на станах винтовой прокатки разного вида [43,44,46,108–118]. Трехмерное моделирование методом конечных элементов используется в качестве эффективного инструмента для описания и сравнения различных параметров при прокатке труб.

При раскатке труб на стане винтовой прокатки МИСиС -130Д прокатываемый металл деформируется между вращающимися бочковидными валками и расположенной между ними цилиндрической короткой оправкой и направляющими линейками. Для проведения численного моделирования процесса раскатки труб принимают вязкопластическую модель. Моделирование процесса раскатки бесшовных труб вели в некоторых работах. Malinowski [119] в своей работе смоделировал процесс раскатки труб на стане Дишера с предположением, что процесс находится в установившемся состоянии без оваллизации. Также в работе выполнен анализ методом конечных элементов процесса раскатки бесшовных труб с использованием модели, представленной в работе [112] на двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками на оправке.

Однако, вышеупомянутые работы направлены на исследование поведения и формоизменения металла при раскатке, и также влияние технологических параметров на точность геометрических размеров. Поведение рабочего инструмента, в том числе применяемых оправок, валков и также направляющего инструмента при прокатке бесшовных труб на станах винтовой прокатки различных видов недостаточно изучено экспериментальным путем и также моделированием. Поэтому углубленные исследования износа трубопрокатного инструмента при прошивке и раскатке гильз в трубы до сих пор не проведено. Более того, количество работы по

изучению износостойкости оправок при прокатке труб с помощью МКЭ ограничено.

В литературе с трудом можно найти исследования, основанные на моделировании износа рабочих инструментов станов винтовой прокатки труб. Можно отметить работу, проведенную научным коллективом кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС», в которой изучили в среде DFORM-3D износ валков и прошивной оправки при прошивке жаропрочных сплавов на стане с бочковидными валками МИСиС-130Д методом конечных элементов. Аналогично инструментам, применяемым в других видах горячего деформирования, инструмент станов винтовой прокатки подвергается износу за счет циклического воздействия термических напряжений и высоких давлений при высокой температуре. Износ инструментов прокатных станов носит сложный характер с взаимодействием различных независимых факторов.

Lim и Ashby [40] утверждают, что скорость износа может быть выражена:

$$w_i = f(F_N, u, T, M) \quad (1.1)$$

где w_i - скорость износа, ($\text{м}^3/\text{м}$);

F_N - нормальная сила, (Н);

u – скольжение металла, ($\text{м}/\text{с}$);

T – температура обработки, ($^{\circ}\text{C}$);

M - свойства материала инструмента (например, предел текучести, МПа).

Существует очевидная необходимость уменьшить количество переменных в уравнении (1.1). Некоторые компоненты можно рассматривать как дискретные переменные, а другие можно принять как приблизительно постоянные значения.

Примером фундаментального подхода для исследования износа разных инструментов горячего деформирования, в частности инструментов стана винтовой прокатки является уравнение Ачарда-Хомла, предназначенное для определения изношенного объема металла инструментов при износе со скольжением прокатываемого металла.

$$W = \frac{K \cdot F_N \cdot L}{\sigma_T}, \quad (1.2)$$

где W – объем изношенного металла, мм^3 ;

F_N – нормальная сила, Н;

L – скользящее расстояние металла, мм;

K – коэффициент износа;

σ_T – предел текучести оправки, МПа.

Однако, с другой стороны, объем изношенного металла при прокатке можно определить произведением глубины износа на контактную площадь с заготовкой:

$$W = \Delta h \cdot A \quad (1.3)$$

где Δh – глубина износа оправки, мм;

A – площадь контакта с заготовкой, мм^2 ;

Из уравнений (1.2) и (1.3) можно оценить глубину слоя износа на оправки за определенное скользящее расстояние металла и получить уравнения (1.4) и (1.5).

$$\Delta h \cdot A = \frac{K \cdot (F_{N_i} \cdot L_i)}{\sigma_{T_i}}, \quad (1.4)$$

$$\Delta h_i = \frac{K \cdot F_{N_i} \cdot L_i}{A \cdot \sigma_{T_i}} \quad (1.5)$$

Известно, что при горячей деформации труб на стане винтовой прокатки контактное давление металла на инструмент можно записать следующим образом

$$P = \frac{F_N}{A}, \quad (1.6)$$

где P – контактное давление металла, МПа.

Помимо этого, скользящее расстояние металла можно определить произведением скорости скольжения металла на определенное время.

$$L = V \cdot \Delta t, \quad (1.7)$$

где V – скорость скольжения металла, мм/с;

Δt – приращение времени, с.

Следовательно, при составлении уравнений (1.6) и (1.7) в уравнение (1.5) получилась формула глубины износа на оправке:

$$\Delta h_i = \frac{K \cdot P_i \cdot V_i}{\sigma_{T_i}} \Delta t. \quad (1.8)$$

При моделировании износа для одного цикла процесса раскатки труб заданного размера, чтобы получить общую глубину износа в точке на поверхности используемой оправки, уравнение (1.8), определяющее глубину износа на оправке, можно записать следующим образом.

$$h = \sum K \cdot \frac{P_i \cdot V_i \cdot \Delta t}{\sigma_{\tau_i}} \quad (1.9)$$

При прокатке бесшовных труб на прокатном стане металл деформируется в горячем состоянии, и согласно вышесказанному в функции, описанной в формуле (1.1), действующее контактное давление на оправку, механические свойства металла и также скольжение металла при прокатке изменяются в зависимости от температуры в определенное время. Отсюда, уравнение (1.9) можно преобразовать в следующий вид.

$$h = \int_0^t K \frac{P_i(T) \cdot V_i(T) \cdot dt}{\sigma_{\tau_i(T)}} \quad (1.10)$$

Основываясь на запланированных вариантах для проведения моделирования, представленных в таблице 2.2 в средстве программы САПР Solidworks, создали твердые трехмерные модели валков и направляющих линеек, оправку и рассматриваемых заготовок. После чего на той же платформе построена 3Д модель очага деформации стана в соответствии с реальными размерами инструмента стана и выбранными параметрами настройки очага деформации для дальнейшего моделирования в Qform с помощью метода конечных элементов (рисунок 2.2).

Угол подачи валков, расстояние между направляющими линейками и заготовка с разной толщиной стенки были выбраны как наиболее важные факторы для исследования, и варьируются по вариантам. Рабочие инструменты стана, такие как валки, направляющие линейки и оправка изготовлены из инструментальных сталей и сплавов. В качестве материала исходной заготовки была использована коррозионностойкая сталь марки 12X18H10T. Исходные заготовки представляли собой гильзы размерами 73 x 8...10 мм, длина которой равна 700 мм. Механические свойства заготовок были взяты из базы данных, используемого программного обеспечения. Раскатной оправкой присвоены свойства стали 4X5МФС. В качестве

материала валков и направляющих линеек были приняты сталь 40Х и сплав ХН55МБЮ соответственно.

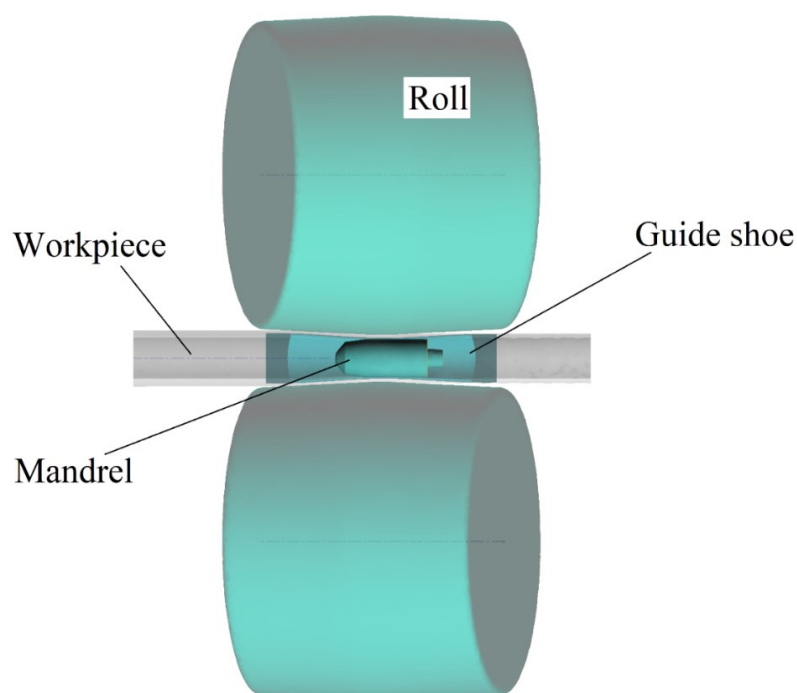


Рисунок 2.2 - Очаг деформации при раскатке труб на цилиндрической оправке

Основные параметры, принятые для запуска моделирования износа оправки при раскатке нержавеющей стали указаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры моделирования

Параметр	Значение
Размеры гильзы:	
- диаметр, мм	73
- толщина стенки, мм	8–10
- длина, мм	700
Материал исходной заготовки	12X18H10T
Температура заготовки, °С	1150
Температура инструмента, °С	20
Коэффициент вытяжки	1,54
Угол подачи, град	10° - 14°
Коэффициент овализации очага деформации	1,12 – 1,15
Материал валков	40X
Материал оправки	4X5МФС
Материал линейки	ХН55МБЮ
Частота вращения валков, об/мин	57

Движение валков задано в одном направлении с одинаковой частотой вращения 57 об/мин вокруг их заданной оси. В данной версии моделирования оправка установлена неподвижной по оси прокатки, её вращательное движение обусловлено моментом, возникающим за счет касания с заготовкой при контакте во время прокатки.

Скольжение между рабочими инструментами и материалом выполнялось по закону постоянного сдвигового трения Ливанова с учетом контактного давления, применяемому на сегодняшний день в большинстве исследований. В данной работе предположено, что сила трения описывается следующей формулой.

$$\tau = \frac{m\sigma_n \left(1 - e^{-b \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}\right)}{\sqrt{3}} \quad (1.11)$$

где τ – сила трения, Н;

σ_n – сопротивление деформации материала, МПа;

σ_s – контактное давление, МПа;

m – фактор трения;

b – экспериментальный коэффициент, принимается $b = 1,25$

Используемые факторы трения для контакта валков с раскатываемой заготовкой составляет 1, а значение фактора трения $m = 0,8$ принимается при контакте рассматриваемой оправки с заготовкой, а для направляющих линеек задан равным 0,4 соответственно.

Коэффициент теплопередачи между инструментом и материалом задавался равным 45 кВт/м²·К. Теплообмен между инструментом и заготовкой рассчитывается «простым» только на контактирующей с заготовкой поверхности. Температура исходных заготовок перед раскаткой задана равной 1150 °С. Температура инструмента задавалась равной комнатной температуре 20 °С. Адаптация сетки прокатываемых заготовок, и также рабочего инструмента стана выполнялась в программе Qform автоматически с

заданным дополнительными областями в цели повышения точности расчета моделирования. Построенная сетка состояла из 312720 тетраэдрических элементов (рисунки 2.3, 2.4).

Свойства сетки					
Объект	Узлов на поверхности	Внутренних узлов	Всего узлов	Поверхностных элементов	Объемных элементов
Заготовка 1 Заготовка_vu2	18351	3642	21993	36702	79867
Инструмент 1 Валок 1	5314	12486	17800	10624	92846
Инструмент 2 Валок 2	5286	12468	17754	10568	92519
Инструмент 3 Отправка	3442	4630	8072	6880	38816
Инструмент 4 Линейка 1	956	270	1226	1908	4272
Инструмент 5 Линейка 2	967	290	1257	1930	4400
Total	34316	33786	68102	68612	312720

Рисунок 2.3 - Свойства сетки элементов

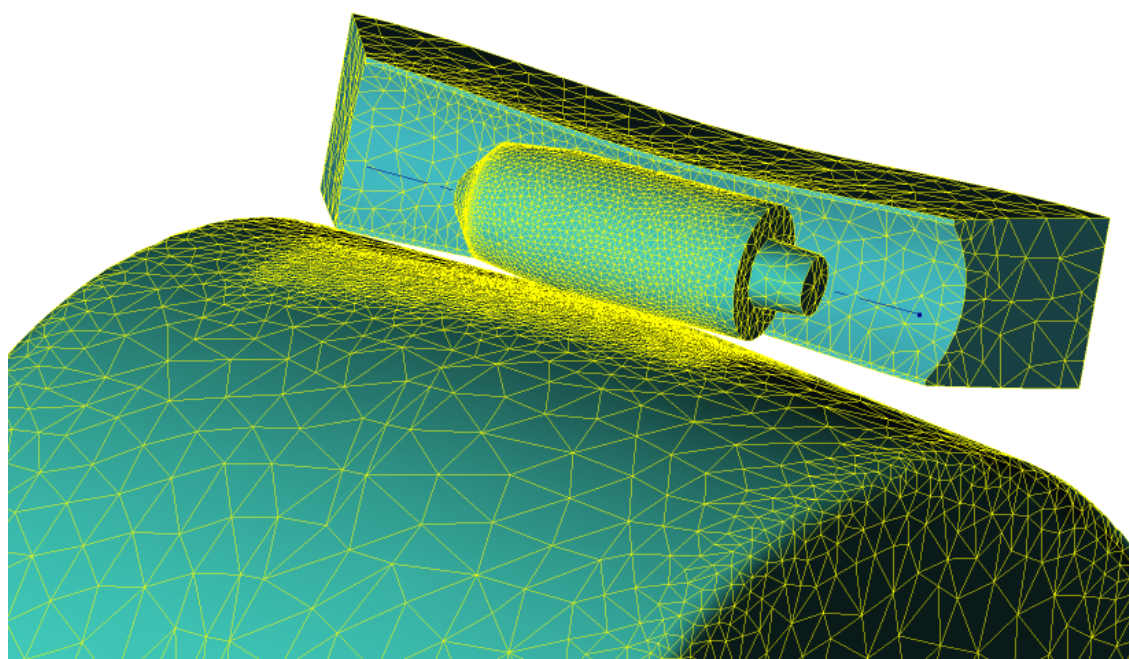


Рисунок 2.4 - Адаптация сеток инструментов

Кроме заготовки, для рабочих инструментов в очаге деформации также были созданы дополнительные области с уменьшением размера элементов сетки. по мимо этого, для сокращения время и упрощения расчета остальные вне этих областях адаптации размеры элементов сетки были заданы более крупными.

Для моделирования износа инструментов стана при прокатке, в частности цилиндрической оправки запускается стандартная подпрограмма, написанная на основе формулы 1.10. Экспериментальные коэффициенты принимаются равным 1.

2.3 Влияние технологических факторов на износ оправки

2.3.1 Зависимость глубины износа оправки от варьируемых факторов

Анализ результатов моделирования показывает, что износ рабочей поверхности оправки распределяется неравномерно по длине. Общая протяженность зоны износа составляет от 65 мм до 75 мм и расположена на участке от середины конической части оправки до пережима. Глубина износа возрастает от начала контакта металла с оправкой до сечения максимального износа, которое наблюдается на участке перехода к цилиндрической части оправки.

Полученные результаты, отражающие износ оправок представлены на рисунке 2.5.

После осуществления раскатки гильзы длиной 700 мм во всех проведенных вариантах показывают, что максимальное значение предсказания износа оправки от радиальных давлений может достигать 0,025 мм. Изнашивание за счёт радиальных давлений имеет значительно более высокий уровень, чем величина износа, вызванного тангенциальным напряжением, в связи с чем было подробно изучено влияние параметров процесса раскатки на данный вид износа инструмента.

Результаты моделирования, в которых заложены распределение температуры и расчет подпрограммы для инструментов экспортированы, и полученные данные направлены на дальнейшую обработку в платформе

языкового программирования Python 3.9 и MATLAB 2018Ra для получения значений на поверхности оправки.

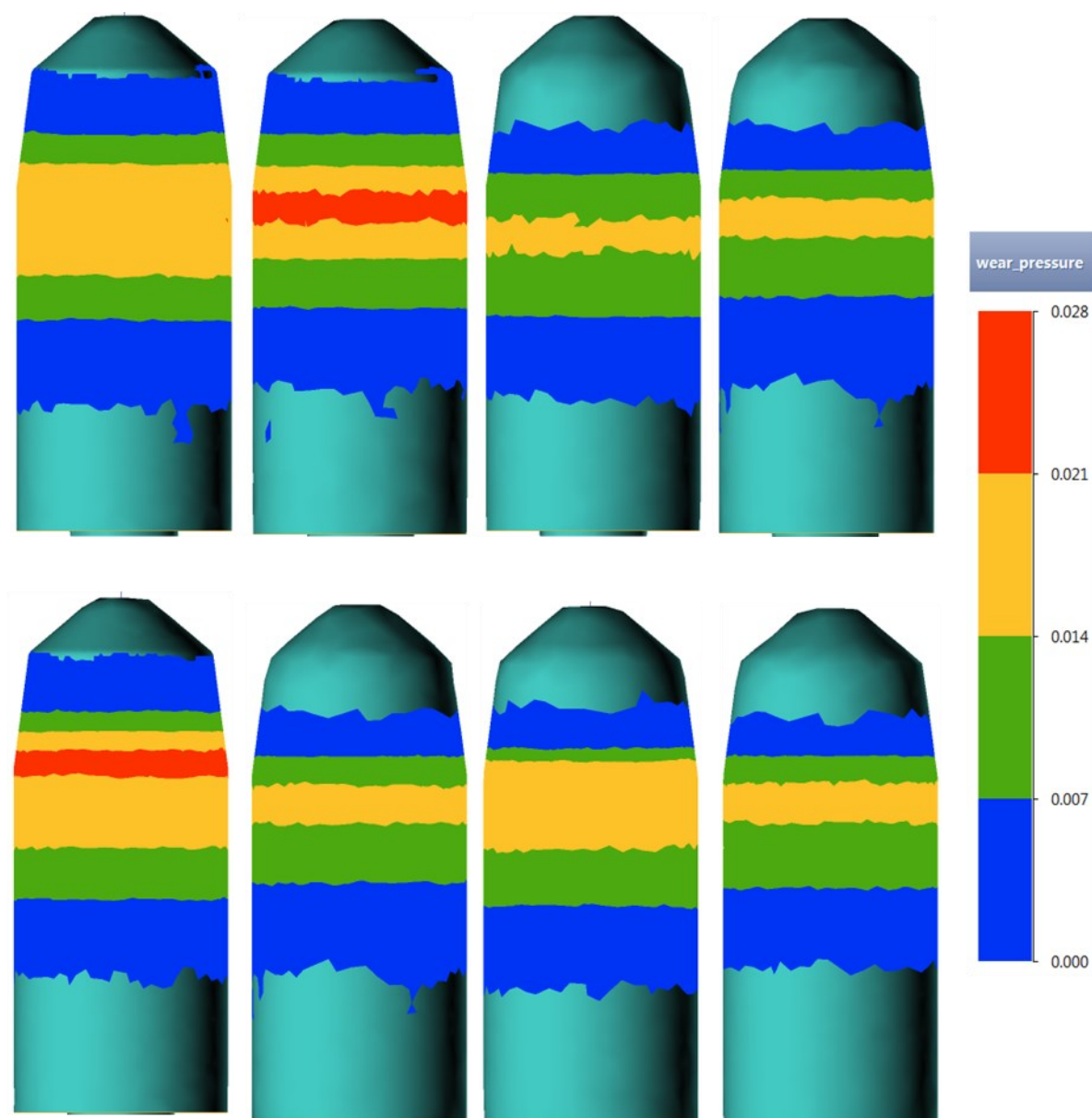


Рисунок 2.5 - Трехмерная модель износа оправки после прокатки трубы из нержавеющей стали.

2.3.2 Коэффициента вытяжки

Для изучения влияния различных факторов на износ оправки при раскатке рассматривались геометрические параметры очага деформации заготовки с оправкой в поперечном сечении (рисунок 2.6).

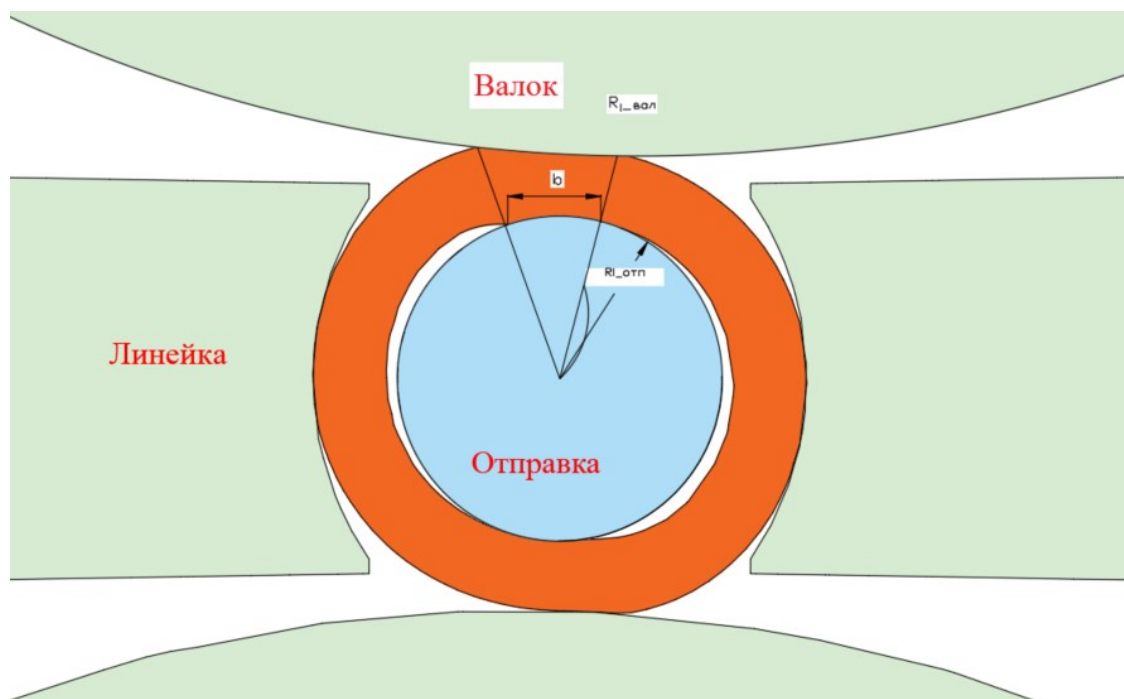


Рисунок 2.6 - Поперечное сечение очага деформация

В ходе исследования распределения износа оправки по её длине, очаг деформации был разделен на разные поперечные сечения. С помощью AutoCad были замерены ширины дуги контакта металла с оправкой в разных поперечных сечениях, значения которых приведены в таблице 2.4.

Исходя из результатов, заметим, что наибольшие длина контакта оправки с заготовкой имеются в зоне между 1-м и 4-м сечениями, соответствующими зоне начала контакта заготовки с оправкой и перехода в цилиндрическую часть оправки с увеличением радиуса. Изменение длины дуги контакта оправки с заготовкой при различных коэффициентах вытяжки показывается на рисунке 2.7.

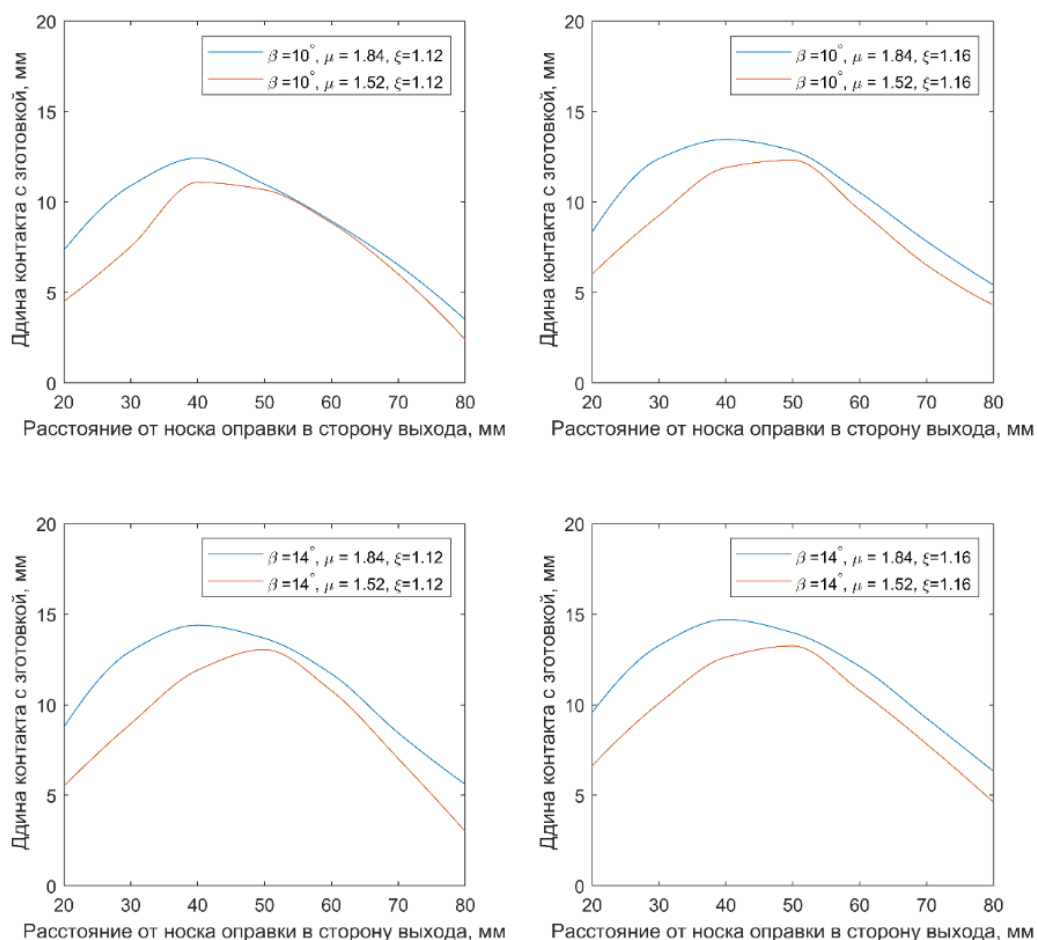


Рисунок 2.7 - Изменение длины дуги контакта оправки с заготовкой по длине в зависимости от коэффициента вытяжки

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии коэффициента вытяжки на геометрию контакта оправки с заготовкой. Анализируя изменение длины контакта оправки с заготовкой, отмечено, что увеличение коэффициента вытяжки от 1,52 мм до 1,84 привело к заметному увеличению длины контакта оправки с заготовкой в зоне перед цилиндрической частью оправки. Уменьшение стенки заготовки при раскатке влечет собой удлинение длины контакта с оправкой в её конусной части больше чем в режиме очага деформации (на цилиндрической части).

Незначительное изменение температуры разогрева оправки на поверхности при изменении коэффициента вытяжки от 1,52 до 1,84 наблюдается по полученным результатам. Максимальная температура нагрева на поверхности приближается к 600°C в очаге деформации.

На рисунке 2.8 изображены графики износа оправок, применяемых при раскатке труб с коэффициента вытяжки от 1,52 до 1,84. Показано, что длина изношенной части оправки уменьшается от 90 мм до 70 мм с уменьшением коэффициента вытяжки с 1,84 по 1,52.

Также замечено, что при снижении обжатия по стенке трубы повышенный износ переменяется к пережиму очага деформации. Уменьшение контактной площади оправки с заготовкой также приводит к сокращения времени контакта рабочей поверхности оправки с горячем металлом, что обусловлено снижением термического напряжения поверхностных слоев, сохраняя твердость металла оправки на поверхности.

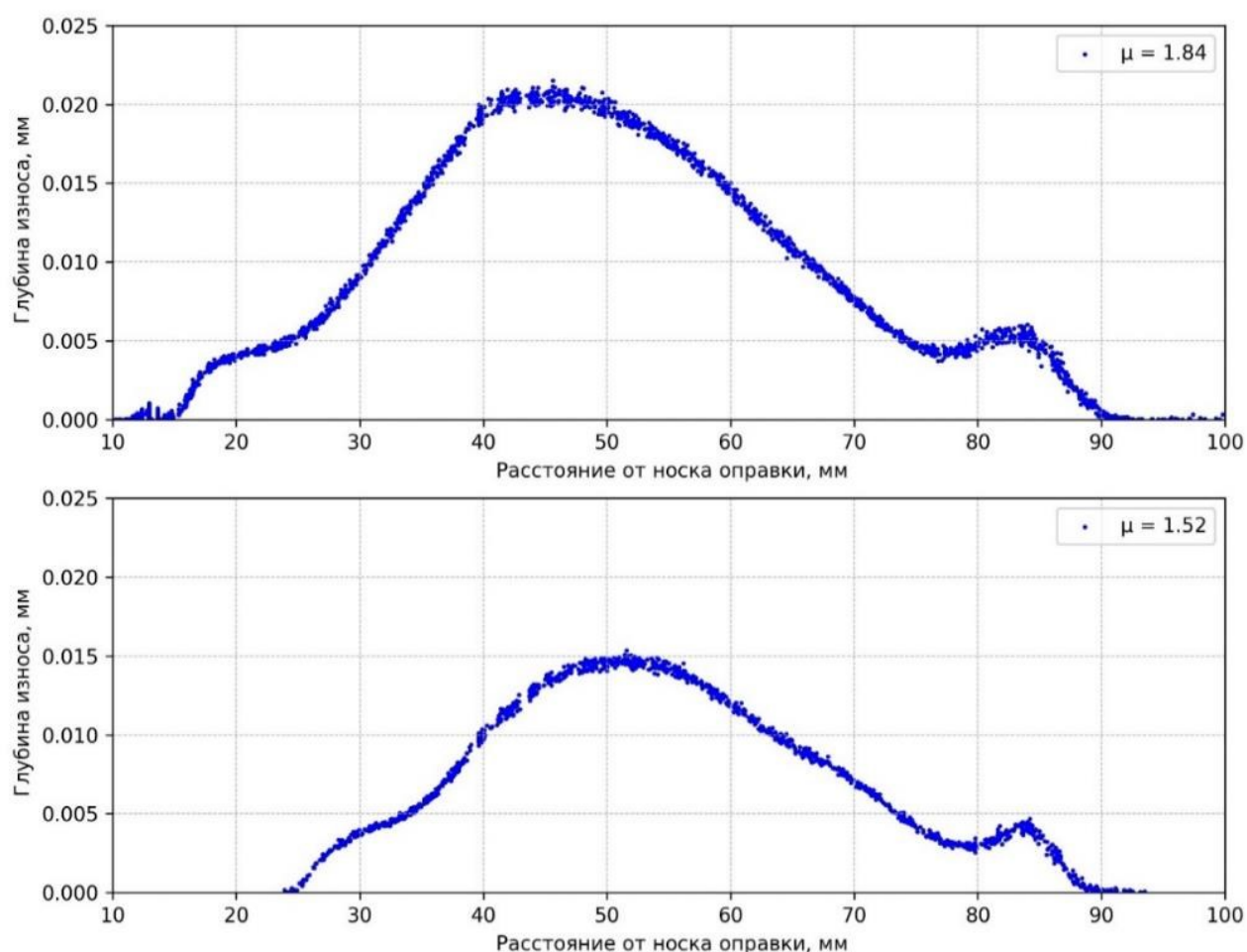


Рисунок 2.8 - Распределение износа оправки в зависимости от коэффициента вытяжки по длине

Таблица 2.4 – Длина дуги контакта в поперечных сечениях

	Сечение	Расстояние от носка оправки, мм	Длина дуги контакта с оправкой, мм		Сечение	Расстояние от носка оправки, мм	Длина дуги контакта с оправкой, мм
Вариант 1	0	20	9.57	Вариант 5	0	20	8.76
	1	30	13.27		1	30	12.96
	2	40	14.71		2	40	14.40
	3	50	13.98		3	50	13.67
	4	60	12.12		4	60	11.71
	5	70	9.25		5	70	8.44
	6	80	6.32		6	80	5.61
Вариант 2	0	20	8.35	Вариант 6	0	20	7.33
	1	30	12.40		1	30	10.90
	2	40	13.46		2	40	12.43
	3	50	12.84		3	50	10.99
	4	60	10.53		4	60	8.95
	5	70	7.83		5	70	6.52
	6	80	5.41		6	80	3.50
Вариант 3	0	20	6.62	Вариант 7	0	20	5.51
	1	30	10.08		1	30	8.95
	2	40	12.63		2	40	11.91
	3	50	13.25		3	50	13.05
	4	60	10.78		4	60	10.78
	5	70	7.83		5	70	7.02
	6	80	4.61		6	80	3.00
Вариант 4	0	20	6.02	Вариант 8	0	20	4.51
	1	30	9.26		1	30	7.53
	2	40	11.91		2	40	11.09
	3	50	12.32		3	50	10.68
	4	60	9.56		4	60	8.85
	5	70	6.52		5	70	6.01
	6	80	4.31		6	80	2.40

По мере уменьшения коэффициента вытяжки время контакта оправки с раскатываемой гильзой при высокой температуре сокращается, составляя 3,5 с при $\mu = 1,84$ и 3с при $\mu = 1,52$ при угле подачи $\beta = 14^\circ$ и коэффициентом овализации $\zeta = 1,08$ и также существенно уменьшается глубина износа.

2.3.3 Угол подачи

По мимо обжатия гильзы при прокатке, на контактную площадь с оправкой оказывает заметное влияние угол подачи. Результаты расчетов, представленные на рисунке 2.9 показывают, что увеличение угла подачи приводит к увеличению длины контакта оправки с заготовкой. В результате чего увеличивается площадь контакта с заготовкой и возрастает осевое усилие металла на оправку. Однако, в то же время повышение угла подачи ведет к снижению времени прокатки, следовательно приводит к снижению температуры разогрева, и возможных возникающих термических напряжений на поверхности оправки при прокатке. Максимальная температуре разогрева оправки наблюдается в сечениях, дистанция которых от носка оправки составляет от 40 мм до 50 мм (рисунок 2.9). Отличие температуры разогрева на поверхности оправки наблюдается в пределах от 100 до 150 градусов.

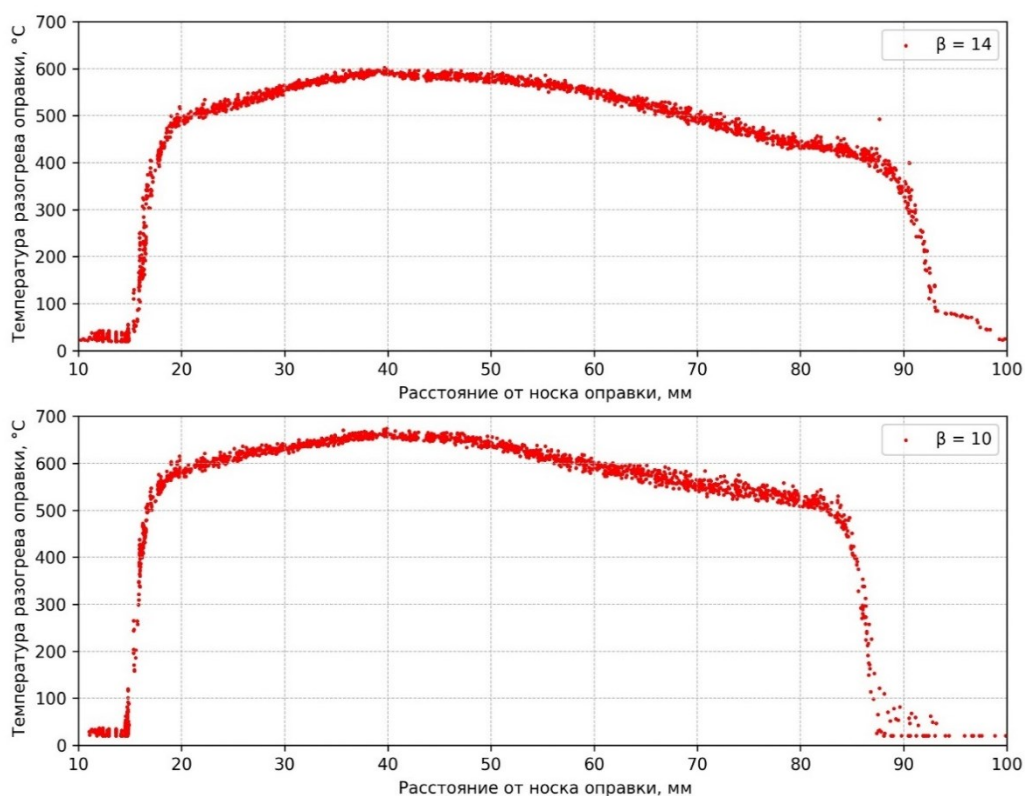


Рисунок 2.9 - Температура разогрева на поверхности оправки в зависимости от угла подачи

На рисунке 2.10 представлено распределение износа поверхности оправки в зависимости от угла подачи. Результаты показали, что увеличение угла подачи от 10 до 14 при раскатке, позволяет снизить износ в сечении от носка оправки на расстояние 40 мм на 11%. Однако, также замечено, что с увеличением угла подачи до 14° износ становится более равномерным по сравнению с углом 10°. Износ на поверхности оправки в очаге деформации до сечения выхода металла из него увеличивается.

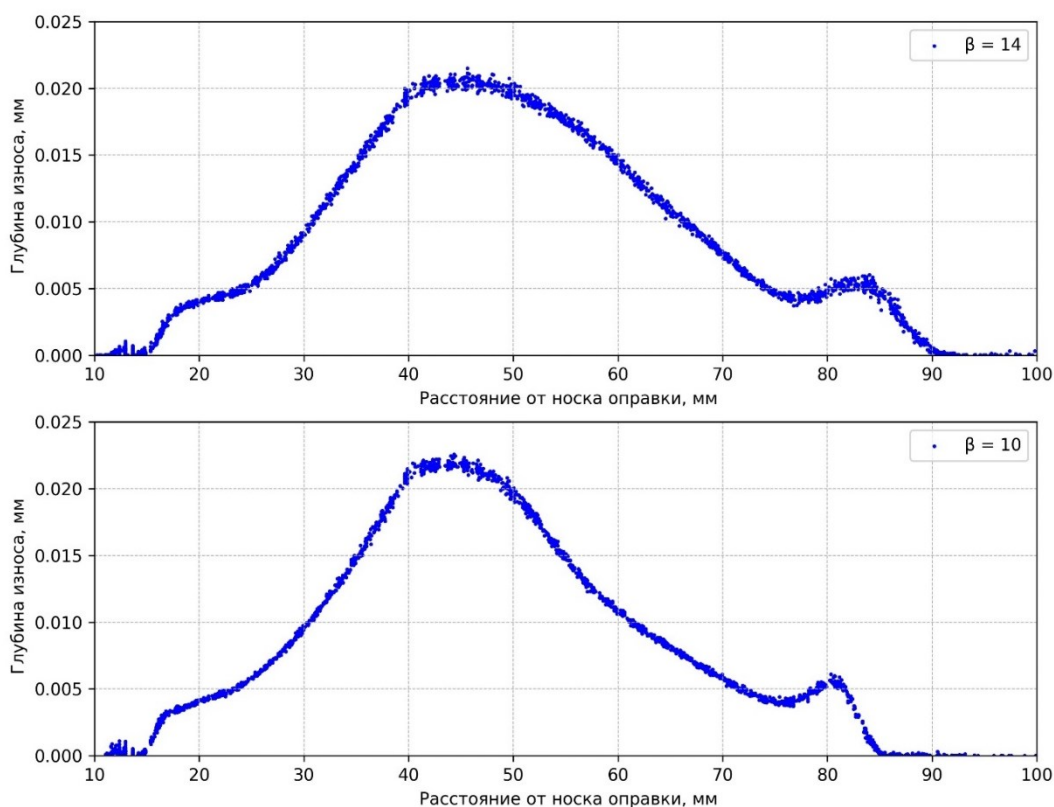


Рисунок 2.10 - Распределение износа оправки в зависимости от угла подачи по длине

2.3.4 Влияние коэффициента овализации

Известно, что коэффициент овализации определяется расстоянием между направляющими линейками в очаге деформации. Уменьшение расстояния между линейками до определенной величины возможно локально

увеличивает контактную площадь оправки с горячим металлом на участке, где горячий металл начинает прикасаться к оправке.

В результате чего удлиняется время контакта с заготовкой в упомянутой зоне, и повышается температура разогрева поверхности (рисунок 2.11), что вызывает повышенный износ на данном участке. Температура нагрева на поверхности в указанной зоне повышается максимально на 100°C . Однако, наблюдается снижение температуры нагрева ее поверхности оправки при сближении линеек в режиме очага деформации, до 50°C .

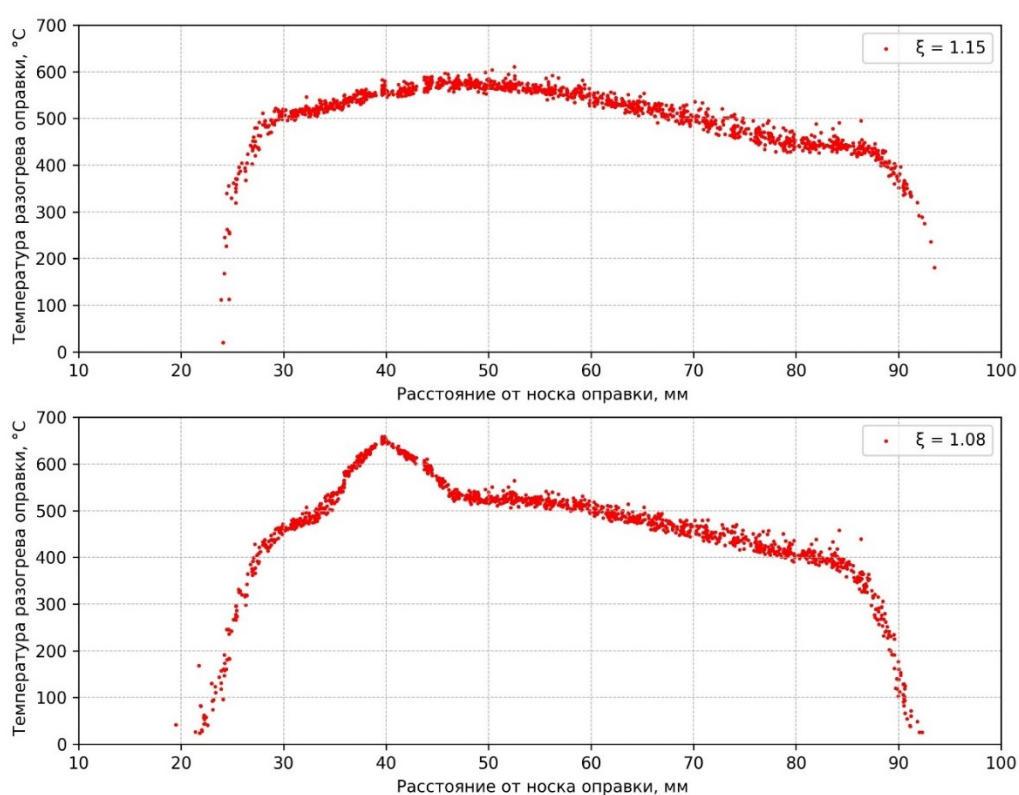


Рисунок 2.11 - Температура разогрева на поверхности оправки в зависимости от коэффициента овализации

Вышесказанным замечанием насчет поведения температуры нагрева на поверхности оправки при изменении коэффициента овализации возможно прогнозировать величину износа (рисунок 2.12).

Видно, что при приближении линеек с коэффициентом овализации $\xi=1,08$ в сечении от носка оправки на расстоянии 40 мм наблюдается

повышенный износ, до 0,02 мм по глубине, значительно больше по сравнению с раскаткой в трубы с коэффициентом овализации $\xi=1,15$.

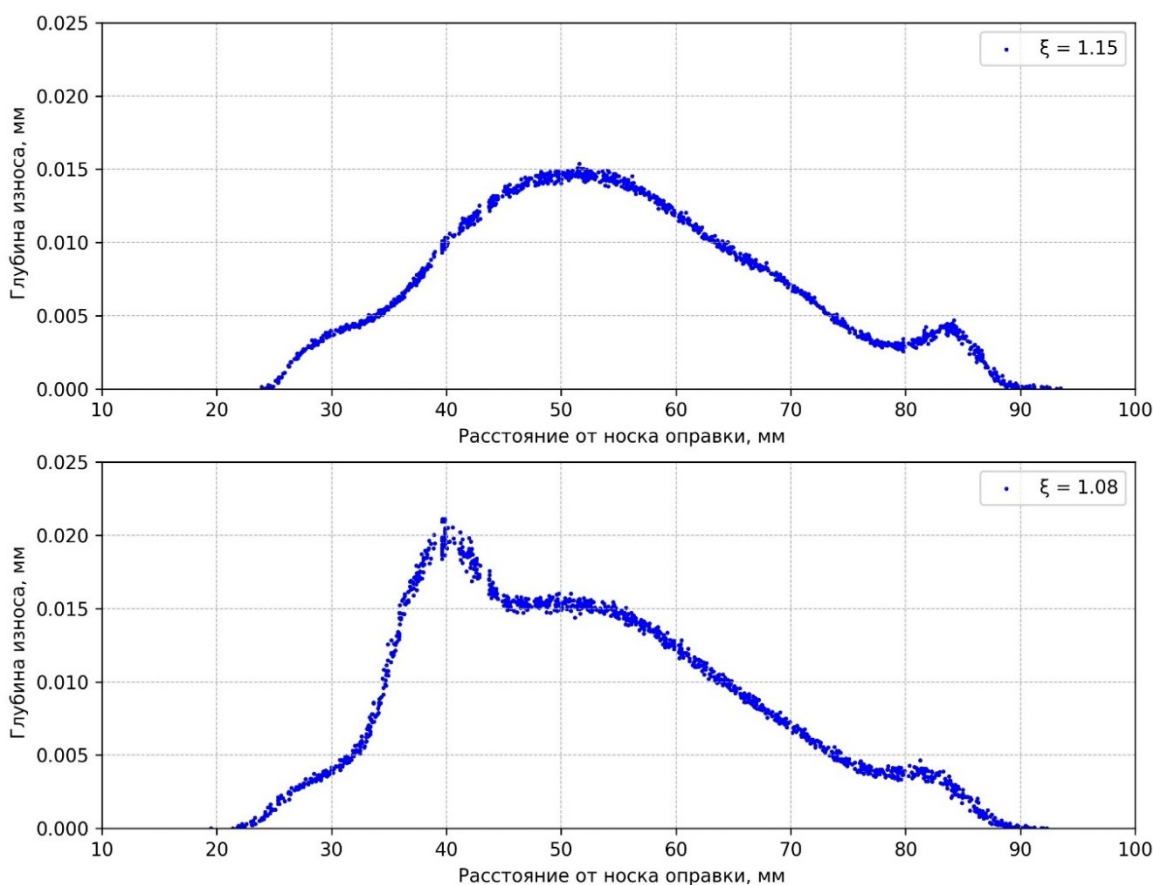


Рисунок 2.12 - Глубина износа оправки в зависимости от коэффициента овализации

2.3.5 Взаимосвязи факторов с износом оправки

Рассмотренные значения глубины износа оправки, которые наблюдаются на участке перехода от конической к её цилиндрической части, соответствующих величинам, полученным на поверхности оправки в сечении, удаленном от носка оправки на расстояние 40 мм. Ниже (рисунок 2.13) представлен кубический график, отражающий среднее значение износа оправки в рассматриваемом сечении во всех проведенных вариантах.

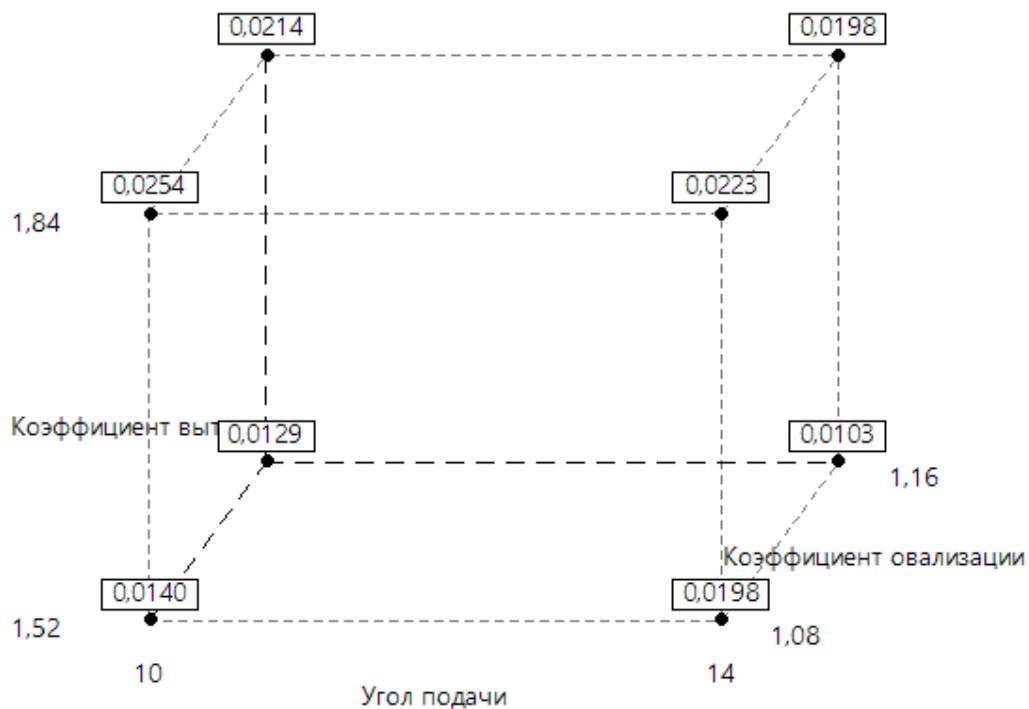


Рисунок 2.13 - Кубический график величин износа, предсказанных в сечении перехода к цилиндрической части

Для установки взаимосвязи основных рассматриваемых параметров с износом оправки, которому подвергались во время прокатки в трубы, использовали программу Minitab 18. Установлена зависимость, позволяющая оценивать глубину износа (H) на поверхности оправки на участке перехода от конической к цилиндрической части оправки, которая имеет следующий вид:

$$h = 2,276 - 12,753 \cdot \text{tg } \beta - 0,61 \cdot \mu - 1,93 \cdot \xi + 4,574 \cdot \text{tg } \beta \cdot \mu + 11,015 \cdot \text{tg } \beta \cdot \xi + 0,517 \cdot \mu \cdot \theta - 3,952 \cdot \text{tg } \beta \cdot \mu \cdot \xi. \quad (2.1)$$

Данная зависимость позволяет прогнозировать максимальные величины износа оправки в рассматриваемом сечении, на основе которых возможно выбрать рациональные режимы прокатки, обеспечивающие износостойкость и рабочий ресурс технологического инструмента.

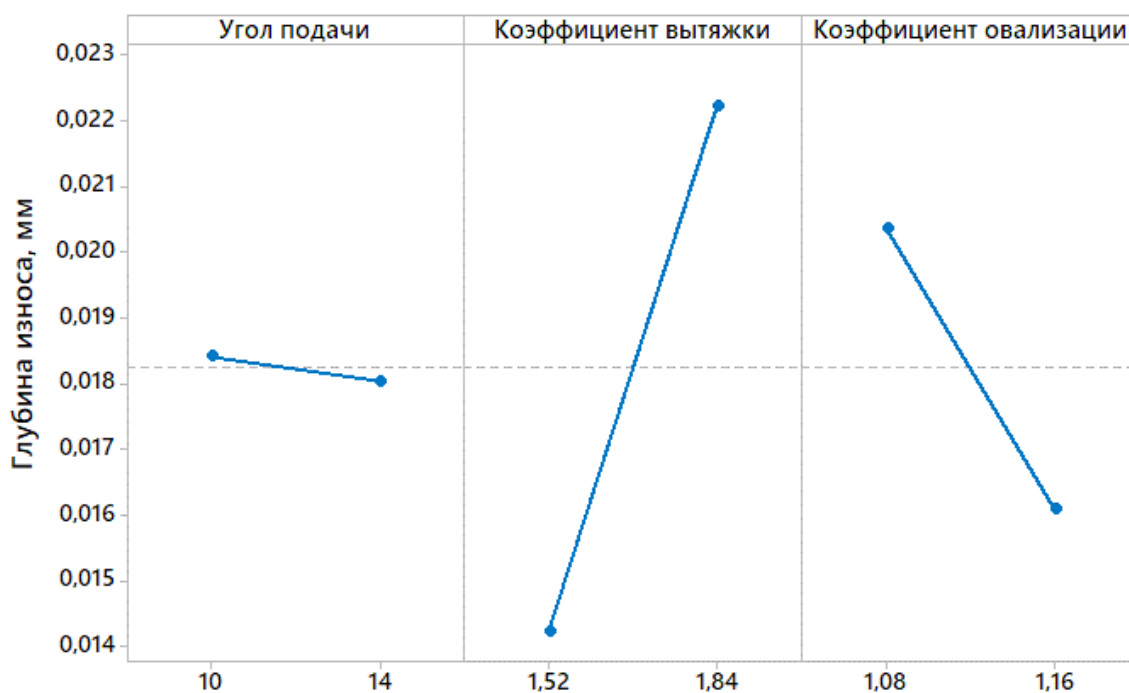


Рисунок 2.14 - Оценка влияния факторов на износ

На основании полученных результатов, и также установленной взаимосвязи износа с факторами в выбранном сечении построили графики, отражающие эффект влияния рассматриваемых факторов на величину прогноза износа.

По графику, изображенному на рисунке 2.14 видно, что коэффициент вытяжки имеет влияние обратного характера на износ в данном сечении по сравнению с двумя остальными факторами. Износостойкость оправки снижается с увеличением коэффициента вытяжки по стенке трубы от 1,52 до 1,84.

Износостойкость оправки прямо пропорционально изменяется с изменением угла подачи и коэффициента овализации в пределах заданных значений этих факторов.

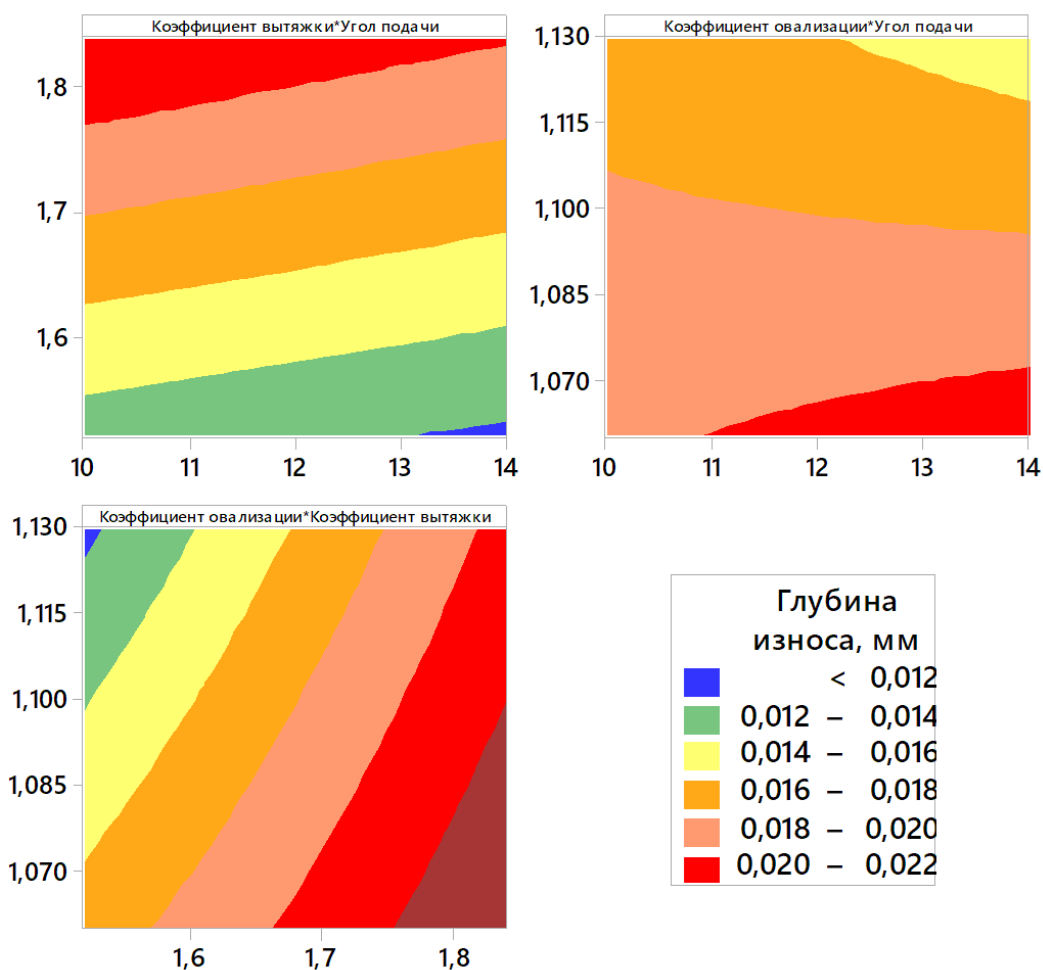


Рисунок 2.15 - Совместное влияние факторов процесса раскатки на износ оправки

На рисунке 2.15 показан график, отражающий двойную зависимость факторов на величину износа в вышесказанном сечении. Минимальный износ, которому подвергалась оправка в сечении перехода к цилиндрической части возможно получить при раскатке с углом подачи $\beta = 14$, коэффициенте вытяжки $\mu = 1,52$ и коэффициенте овализации равном 1,16.

2.3.6 Температуры нагрева оправки при раскатке

В таблице 2.5 приведены значения времени, и длины физического контакта оправки с прокатываемым металлом, а также температура разогрева

рабочей поверхности оправки, полученные в результате моделирования разных вариантов раскатки труб.

Наблюдения показывают, что причиной интенсивного износа оправки является схватывание и вынос металла с рабочей поверхности оправки. Очевидно, что высокая температура поверхности снижает механические свойства материала оправки и способствует развитию адгезионных процессов между материалом инструмента и заготовки, снижает твердость металла. Рост температуры поверхности может привести к интенсивному изнашиванию за счёт циклических высокотемпературных воздействий и высоким контактным давлением.

Таблица 2.5 – Результаты моделирования

№	Время контакта (t), с	Температура нагрева T, °C	Длина контакта l, мм
1	3.7	660.0	14.71
2	4.90	680.00	13.46
3	3.25	540.00	12.63
4	4.00	550.00	11.91
5	3.73	650.00	14.40
6	4.60	652.00	12.43
7	2.80	580.00	11.91
8	3.70	630.00	11.30

С целью оценки влияния уровня температурного поля оправки на процесс изнашивания при раскатке построено уравнение регрессии методом наименьших квадратов. Линейное уравнение регрессии, отражающее зависимость полученных значений износа оправок в сечении перехода к цилиндрической части оправки, имеет вид:

$$h = \frac{-31.494 + 0.0856 \cdot T}{1000} \quad (2.2)$$

Данное уравнение описывает изменение предсказуемых значений износа оправки в зависимости от температуры в сечении перехода от

конической части оправки в цилиндрическую, в котором металл заготовки начинает контактировать с оправкой.

Кроме свойства материала оправок и исходного температурного режима раскатки, температура нагрева на поверхности оправки значительно зависит от времени t контакта с металлом и длины контактной поверхности l . Для этого из полученных результатов моделирования в выше рассматриваемом сечении также получено уравнение, описывающее изменение температуры поверхностного металла от общего времени и длины физического контакта с прокатываемым металлом.

Взаимосвязь этих факторов имеет вид:

$$T = 119.05 + 33.59 \cdot t + 24.47 \cdot l \quad (2.3)$$

Отсюда видно, что увеличение длины контакта и времени воздействия рабочей поверхности оправки с заготовкой сопровождается повышением уровня нагрева металла оправки. Сокращение машинного времени прокатки может привести к существенному снижению разогрева поверхности оправки, и позволяет повышать износостойкости оправок.

2.4 Скольжение металла на контактной поверхности оправки

Согласно формуле (1), немалым важным фактором, влияющим на износ, является скольжение металла заготовки по поверхности оправки.

При винтовой прокатке скольжение металла относительно поверхности оправки определяется отношением скорости оправки к скорости металла на внутренней поверхности гильзы. При исследовании кинематических параметров процесса винтовой прокатки с учётом расположения валков к оси прокатки под углом подачи, заготовке сообщается вращательно-поступательное движение в очаге деформации, разделяющееся на тангенциальное и осевое.

Теоретическая скорость перемещения заготовки в осевом направлении

$$V_3^o = \frac{\pi \cdot \omega_B \cdot D_B}{60} \cdot \sin \beta \quad (2.4)$$

где ω_B - частота вращения валков, мин-1;

D_B - диаметр валков в i -сечении;

β – угол подачи валков.

Скорость перемещения заготовки в тангенциальном направлении

$$V_3^t = \frac{\pi \cdot \omega_B \cdot D_B}{60} \cdot \cos \beta \quad (2.5)$$

Окружная скорость оправки равна

$$U_T = \frac{\omega_o \cdot D_{oi}}{2} \quad (2.6)$$

где ω_o - частота вращения оправки;

D_{oi} - диаметр оправки в i -сечении.

Коэффициент осевой скорости на оправке по внутренней поверхности гильзы -трубы равен

$$\eta_o = \frac{U_o}{V_3^o} \quad (2.7)$$

Коэффициент тангенциальной скорости на оправке по внутренней поверхности гильзы -трубы равен

$$\eta_T = \frac{U_T}{V_3^t}, \quad (2.8)$$

где η_o – коэффициент осевой скорости металла на оправке;

η_T - коэффициент тангенциальной скорости металла на оправке;

U_0 – скорость перемещения оправки по оси прокатки, мм/с.

На рисунке 2.16 показаны кинематические параметры процесса раскатки на короткой цилиндрической оправке. Как видно, скорость рассматриваемой точки, находящейся на внутренней поверхности заготовки и на оправке можно описать таким образом

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_3^{\tau} + \vec{V}_3^o, \quad (2.9)$$

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_o + \vec{V}_{ск}, \quad (2.10)$$

$$\vec{V}_{ск} = (\vec{V}_3^{\tau} - \vec{V}_{опр}^{\tau}) + (\vec{V}_3^o - \vec{V}_{опр}^o), \quad (2.11)$$

$$V_{ск} = \sqrt{(V_3^{\tau} - V_{опр}^{\tau})^2 + (V_3^o - V_{опр}^o)^2} . \quad (2.12)$$

Металл скользит по оправке как в осевом, так и в тангенциальном направлениях, и направление результирующей скорости скольжения в каждой точке контактной поверхности можно определять отношением скорости металла и инструмента в тангенциальном или осевом направлениях.

Необходимо отметить, что изменение скорости контролируемой перемещаемой оправки ведет к изменению осевой скорости прокатки. Видно, что с увеличением скорости контролируемого перемещения оправки против хода прокатки приводит к росту скольжения прокатываемого металла по рабочей поверхности оправки.

В полном соответствии с размерами рабочих инструментов стана МИСиС-130Д и параметрами очага деформации в предыдущих проведенных исследованиях запускалось в Qform моделирование процесса раскатки на короткой контролируемо-перемещаемой цилиндрической оправке, удерживаемой стержнем, работающим на сжатие. Для сравнения были выбраны две величины скорости контролируемой перемещаемой оправки против хода прокатки 4 мм/с и 8 мм/с. Далее, основываясь на выше полученных результатах в качестве рационального режима прокатки, использовались параметры очага деформации с углом подачи $\beta = 14^\circ$,

коэффициентом вытяжки $\mu = 1,54$ и коэффициентом овализации $\xi = 1,16$. Для дальнейшего анализа полученные результаты занесены в таблицу 2.6

Таблица 2.6 – Параметры моделирования процесса раскатки на контролируемо-перемещаемой оправке

Скорость перемещения оправки, мм/с	Контактное время оправки с прокатываемой заготовкой, с	Длина подвергнутого участка износу, мм
0	3.9	70
4	3.8	80
8	3.6	90

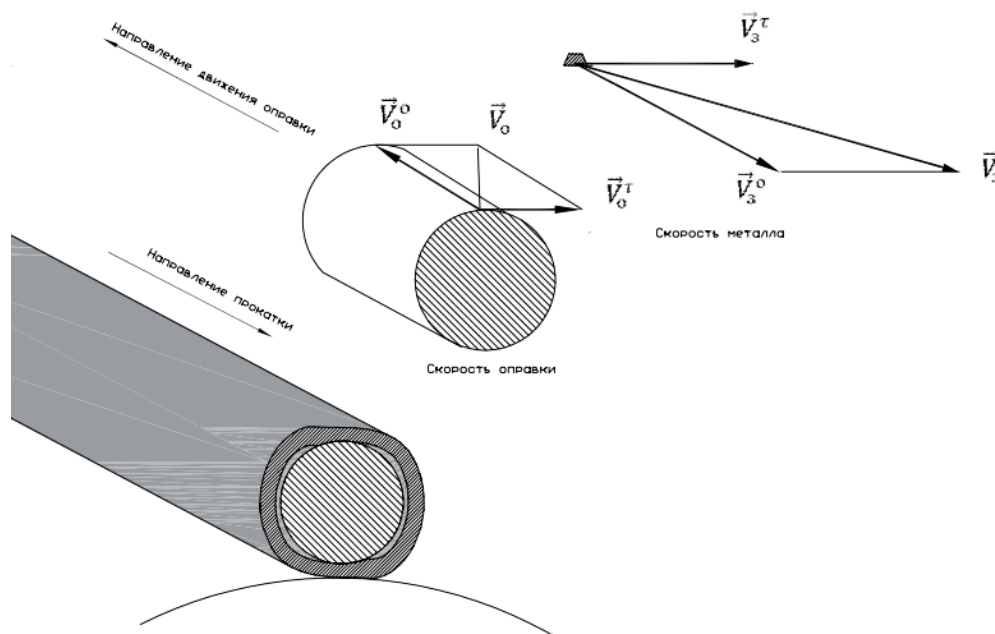


Рисунок 2.16 - Кинематические параметры процесса раскатки

При одинаковых условиях гильза на всей длине оправки имеет практически одинаковую угловую скорость, следовательно скольжение металла в тангенциальном направлении в любой точке на оправке не меняется при изменении скорости перемещения оправки вдоль оси прокатки.

С изменением скорости поступательного движения оправки при моделировании процесса раскатки, не изменяя настройку параметров очага деформации наблюдалось меньшее отклонение скольжения металла от осевого направления. В таблицу 2.6 приведены результаты зафиксированного

контактного времени оправки с прокатываемым металлом и длины подвергнутого участка износу при моделировании процесса раскатки труб при одинаковой настройке очага деформации. Можно заметить, что увеличение скорости перемещения оправки против хода прокатки время контакта оправки с деформируемым материалом сократится в связи с ростом скольжения металла в осевом направлении.

Направление результирующей скорости скольжения прокатываемого металла совпадает с направлением результирующей сил трения на оправке при прокатке. Незначительное и равномерное отклонение сил трения от осевого направления за счет увеличения осевой составляющей скорости скольжения металла на контакте оправки с гильзой ведет к увеличению осевого усилия при этом силы трения стремятся скрутить оправку в тангенциальном направлении. Это позволяет снизить расходуемую энергию на самой оправке, на разогрев и истирание.

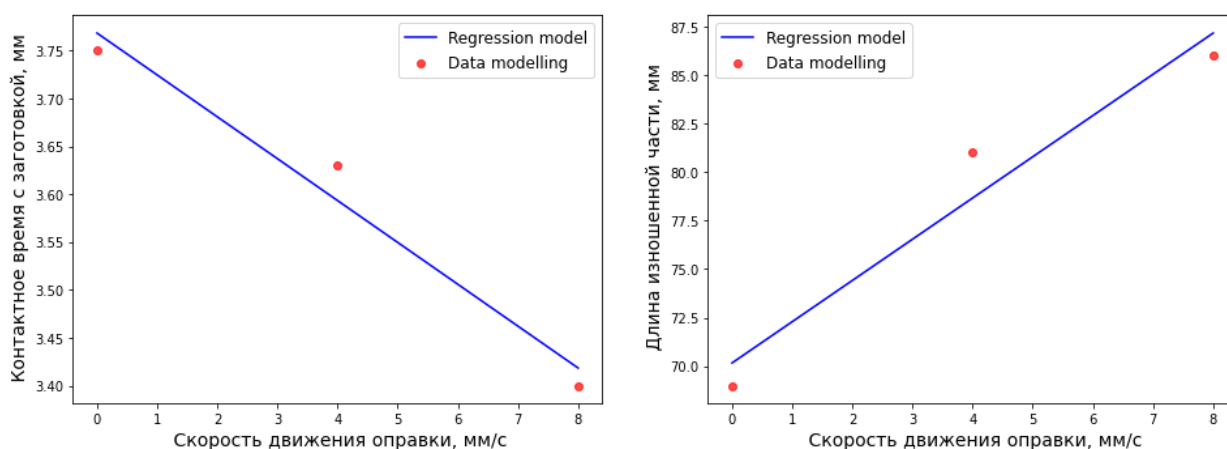


Рисунок 2.17 - Контактное время оправки с металлом и длина изношенной части оправки

Взаимосвязь контактного времени оправки с заготовкой и длины участка износа со скоростью передвижения оправки вдоль оси прокатки, представленные на рисунке 2.17 показывают, что увеличение скорости перемещения оправки против хода прокатки ведет к удлинению участка, подвергнутого износу. При применении удерживаемой свободно

вращающейся оправки длина изношенного участка составила 70 мм, а при раскатке труб на короткой контролируемо- перемещаемой оправке со скоростями 4 мм/с и 8 мм/с против хода прокатки длины изношенного участка на ней составляли соответственно 80 и 90 мм.

Сокращение времени физического контакта оправки с прокатываемым металлом и также удлинение повергаемой зоны износу при раскатке на контролируемо-перемещаемой оправки позволяет снизить цикл воздействия на оправку в одной определенной любой точке контакта, вследствие чего приводит к уменьшению его пикового износа в очаге деформации по сравнению с удерживаемой оправкой (рисунок 2.18).

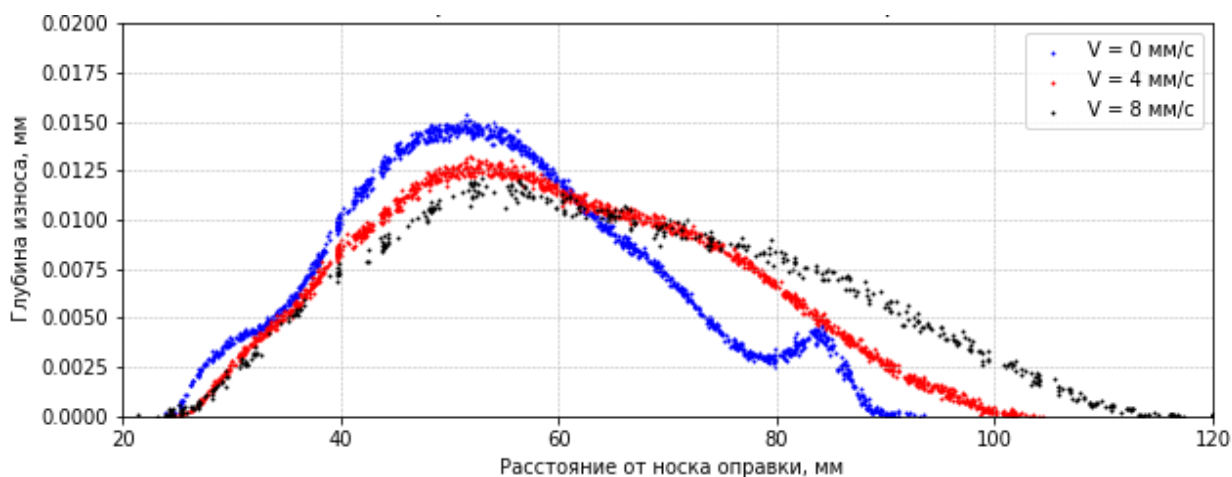


Рисунок 2.18 - Распределение износа оправки с изменением скорости перемещения

При этом стоит отметить, что распределение износа по длине оправки становится более равномерным с увеличением скорости передвижения оправки вдоль оси прокатки. Пиковые значения предсказанного износа при моделировании процесса раскатки труб на удерживаемой свободно вращающейся оправке достигаются до 0,015 мм за одну прокатанную трубу заданных размеров.

Эти значения глубины износа уменьшаются до 0,0125 мм и 0,011 мм за один проход на оправке, контролируемой перемещаемой со скоростью

соответственно 4 мм/с и 8 мм/с против хода прокатки. С другой стороны, с увеличением скорости передвижения оправки величины предсказанного износа увеличиваются в зонах за участком выхода металла из установившегося очага деформации в валках.

И так, перемещение оправки во время проведения раскатки гильз в трубы позволяет уменьшать время физического контакта с горячим прокатываемым металлом, и цикл воздействия на поверхность оправки за счет расширения общей площади контакта по длине. Увеличение хода перемещения оправки против хода прокатки способствует более интенсивному течению металла в осевом направлении. Замечено, что применение подобной оправки в установившемся очаге деформации позволяет также снизить износ и получить более равномерное распределение износа по длине. Благодаря чему возможно получить готовые трубы с улучшением качества внутренней поверхности изменением скоростных параметров процесса вместе с более равномерным износом оправки.

Выводы.

На основе проведенного исследования процесса раскатки труб на двухвалковом стане винтовой прокатки с применением короткой цилиндрической оправки были выявлены и предложены основные технологические параметра процесса, оказывающие влияние на качество и точность получаемых труб, также износостойкость инструмента.

Проведено планирование эксперимента процесса раскатки гильз в трубы на короткой цилиндрической оправке диаметром 50 мм, укрепленной на стержне с учетом характеристик стана винтовой прокатки МИСиС-130Д. Проведено моделирование процесса раскатки в среде программного комплекса Qform включая расчет износа оправки подпрограммой без учёта налипания прокатываемого металла на ее рабочую поверхность.

Исходя из полученных результатов моделирования построена взаимосвязь величины прогнозируемого износа поверхности оправки от рассматриваемых основных технологических параметров процесса раскатки в сечении, переходном к цилиндрической части оправки. Изучено влияние на изнашивание оправки при раскатке основных факторов процесса раскатки, и предположены рациональные режимы прокатки для получения высокоточных тонкостенных труб с наименьшим износом оправки.

Кроме этого, по ходу выполнения исследования изучен эффект скольжения металла, и его влияние на износ раскатной оправки. Установлено, что, смещая оправку вдоль оси прокатки может увеличить её износостойкость оправки, и получить наиболее равномерное распределение износа по длине рабочей части.

3 Исследования процесса раскатки труб из коррозионностойких марок стали на стане МИСиС 130 Д

3.1 Технология получения бесшовных труб из коррозионностойких сталей на стане МИСиС 130Д

В способ получения тонкостенных труб из коррозионностойких сталей на стане МИСиС 130Д (рисунок 3.1) включаются прошивка заготовок в гильзы и их раскатка в черновые трубы на цилиндрической оправке, укрепленной на стержне, работающем на сжатие, при неизменном положении валков и линеек.



Рисунок 3.1 - Двухвалковый стан МИСиС-130Д с нагревательной печью

Экспериментальные исследования производились на опытно-промышленном двухвалковом стане винтовой прокатки МИСиС – 130Д, оснащённом бочковидными валками с линейками в качестве направляющего инструмента, техническая характеристика которого приведена в таблице 3.1. Рабочие валки выполнены с углом наклона образующей входного конуса

2°30′, пережимом длиной 20 мм и углом наклона образующей выходного конуса 3° (рисунок 3.2).

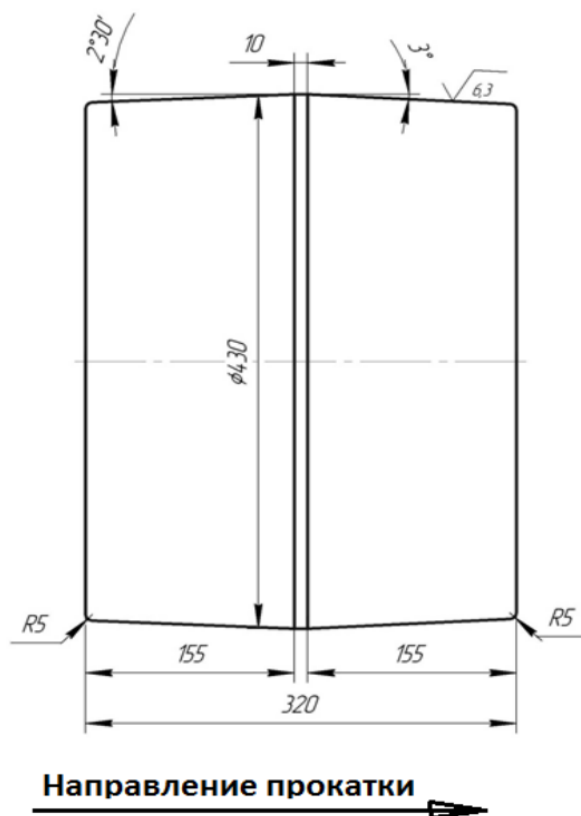


Рисунок 3.2 - Бочковидный валок стана винтовой прокатки МИСиС-130Д

Направляющие линейки спроектированы традиционной формы с углом наклона, образующей входного желоба 5°, цилиндрическим участком перед пережимом валков длиной 30 мм и выходным желобом с углом наклона образующей 2°30′. Линейки изготовлены литьем из высоколегированного сплава бидулоида с твердостью HRC 56...58 (рисунок 3.3).

В качестве прокатываемого материала использованы прутки диаметром 60 мм из коррозионностойкой стали марки 20Х13. На первом этапе исследования осуществляли экспериментальную прошивку заготовок в гильзы диаметром 62–70 мм с различной толщиной стенки на оправках диаметром 46 мм и 43,5 мм (рисунок 3.4) соответственно. Прокатка проводилась в соответствии с настройкой очага деформации, указанной в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика стана МИСиС-130Д

Параметры	МИСиС-130Д
Рабочие валки:	
диаметр в пережиме, мм	(418) 412 - переточка
длина бочки, мм	320
угол подачи, град	8...24
угол раскатки, град	0
направляющий инструмент	линейки
Главный привод:	
Мощность электродвигателей, кВт	индивидуальный
Крутящий момент на одном валке, кН·м	2х250
Выходная сторона:	2х25
тип	с боковой выдачей гильз и
Осевое усилие на оправку, кН	труб
Длина оправочного стержня, мм	до 300
Заготовка:	1800
диаметр, мм	
длина, мм	35...110
Пруток, гильза, труба:	150...800
диаметр, мм	32...110
длина, мм	до 1200

Для засыпки стеклосмазки и улучшения условий вторичного захвата при прошивке заготовки подвергали с переднего торца зацентровке сверлением на токарном станке сверлом $\phi 20$ на глубину 30...40 мм.

Оправки после механической обработки, направлены к нагреву до температуры 930°C, выдержкой в течение 1,5 часов в камерной электрической печи, и последующему охлаждению на воздухе.

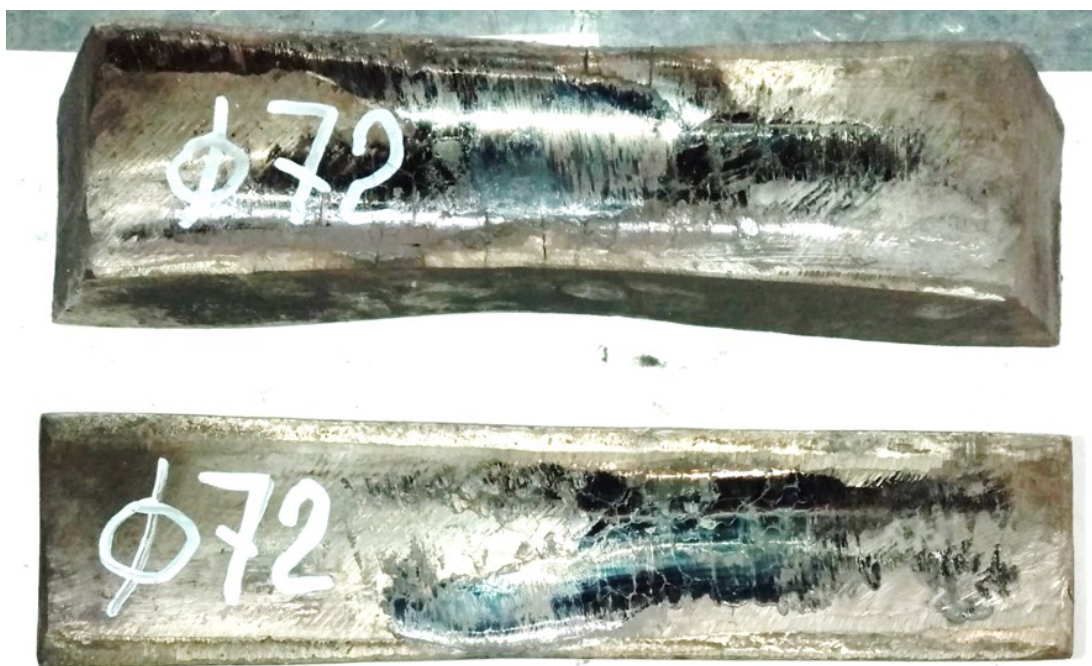


Рисунок 3.3 - Направляющие линейки

В результате на поверхности оправок сформировался оксидный слой толщиной примерно 0,3 мм. Нагрев заготовок перед прошивкой выполняли в электропечи камерного типа мощностью 38 кВт (рисунок 3.1 а) в течение 1 часа 30 мин. Процесс прошивки заготовок из коррозионностойкой стали 20Х13 в гильзы размеров, указанных в таблице 3.2 протекал стабильно при угле подачи валков 14° при частоте вращения рабочих валков 30 об/мин.

После охлаждения гильзы подвергали визуальному осмотру и измерению геометрических параметров по схеме, представленной на рисунке 3.5, с использованием нижеуказанных инструментов с точностью измерения 0,01 мм. Средние значения результатов измерений перенесли в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры процесса прошивки на стане МИСиС-130Д

D _з , мм	Марки стали	β, град	U _п , %	U ₀ , %	ξ	D _г , мм	S _г , мм	Диаметр оправки, мм	D/S	T, °C
60	20Х13	12	11,0	7,0	1,14-1,17*	70	9	46	7.5	1180–1200
60	20Х13	12	11-12	6..8	1,11-1,12	62	8	43,5	7,75	1180–1200



Рисунок 3.4 - Прошивные оправки стана МИСиС-130Д для прошивки стали 20Х13

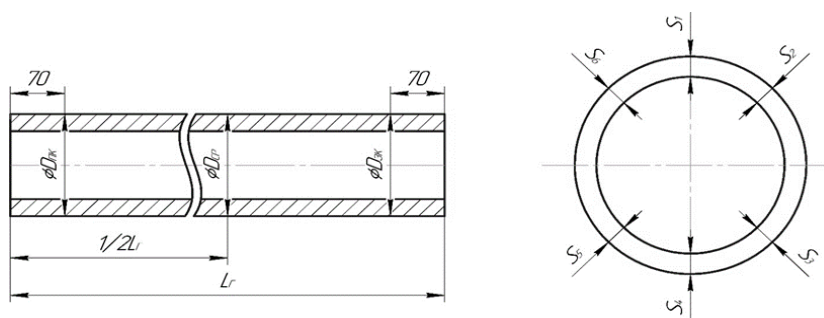


Рисунок 3.5 – Схема и инструменты для измерения геометрических параметров гильз и труб

Раскатку полученных гильз в трубы проводили также на двухвалковом стане МИСиС-130Д. Экспериментальная раскатка гильз в черновые трубы осуществлена по двум маршрутам с указанными таблице 3.3 основными параметрами настройки стана и очага деформации (рисунок 3.6–3.7).

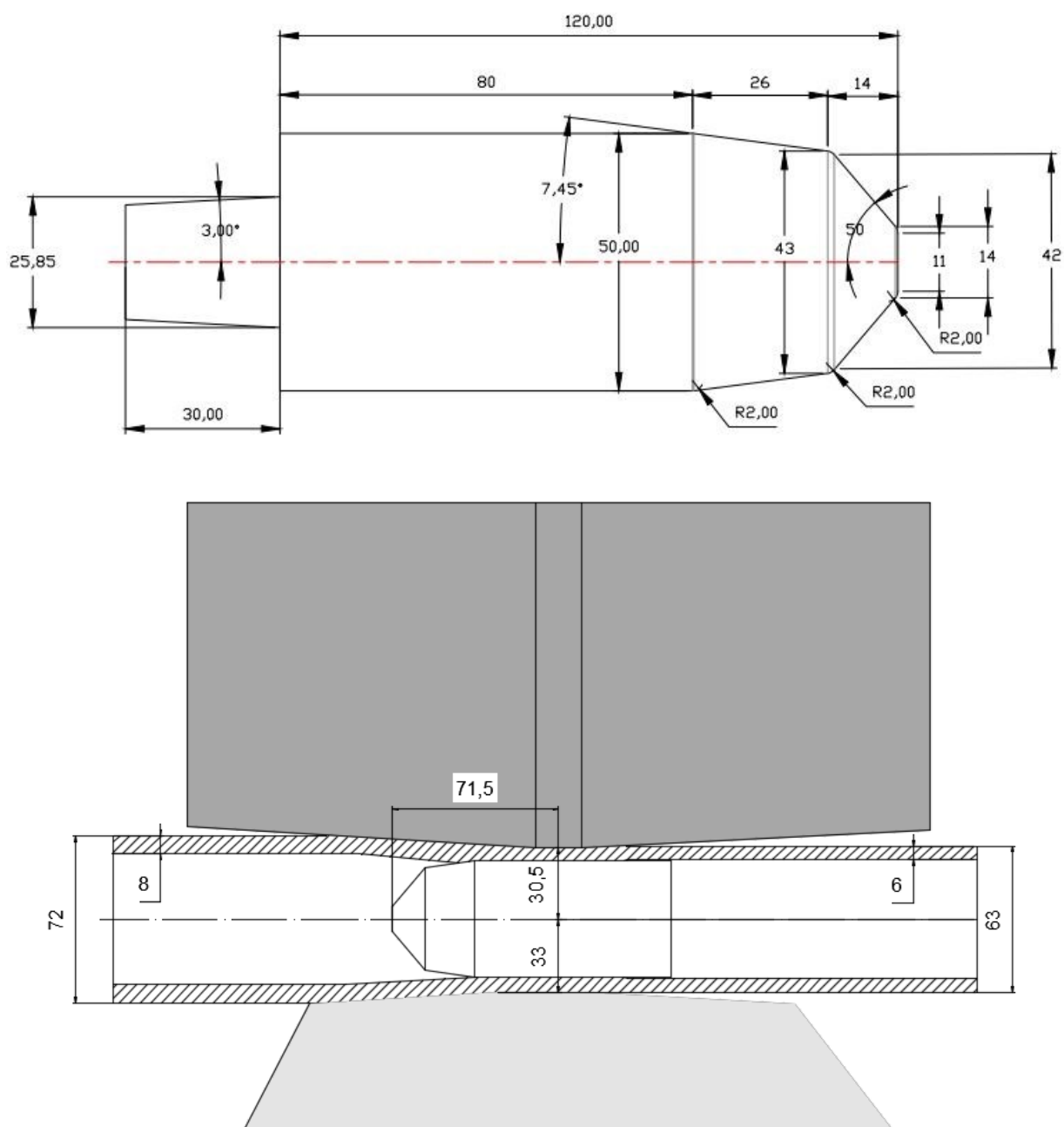


Рисунок 3.6. Геометрические размеры раскатной оправки диаметром 50 мм и очаг деформации при раскатке гильзы $D_r \times S_r = 70 \times 9$ мм в трубу $D \times S = 62 \times 6$ мм

По первому маршруту, полученные прошивкой на оправке диаметром 46 мм гильзы раскатали на цилиндрической оправке диаметром 50 мм, изготовленной из стали 4Х5МФС в трубы размерами 62х6 мм.

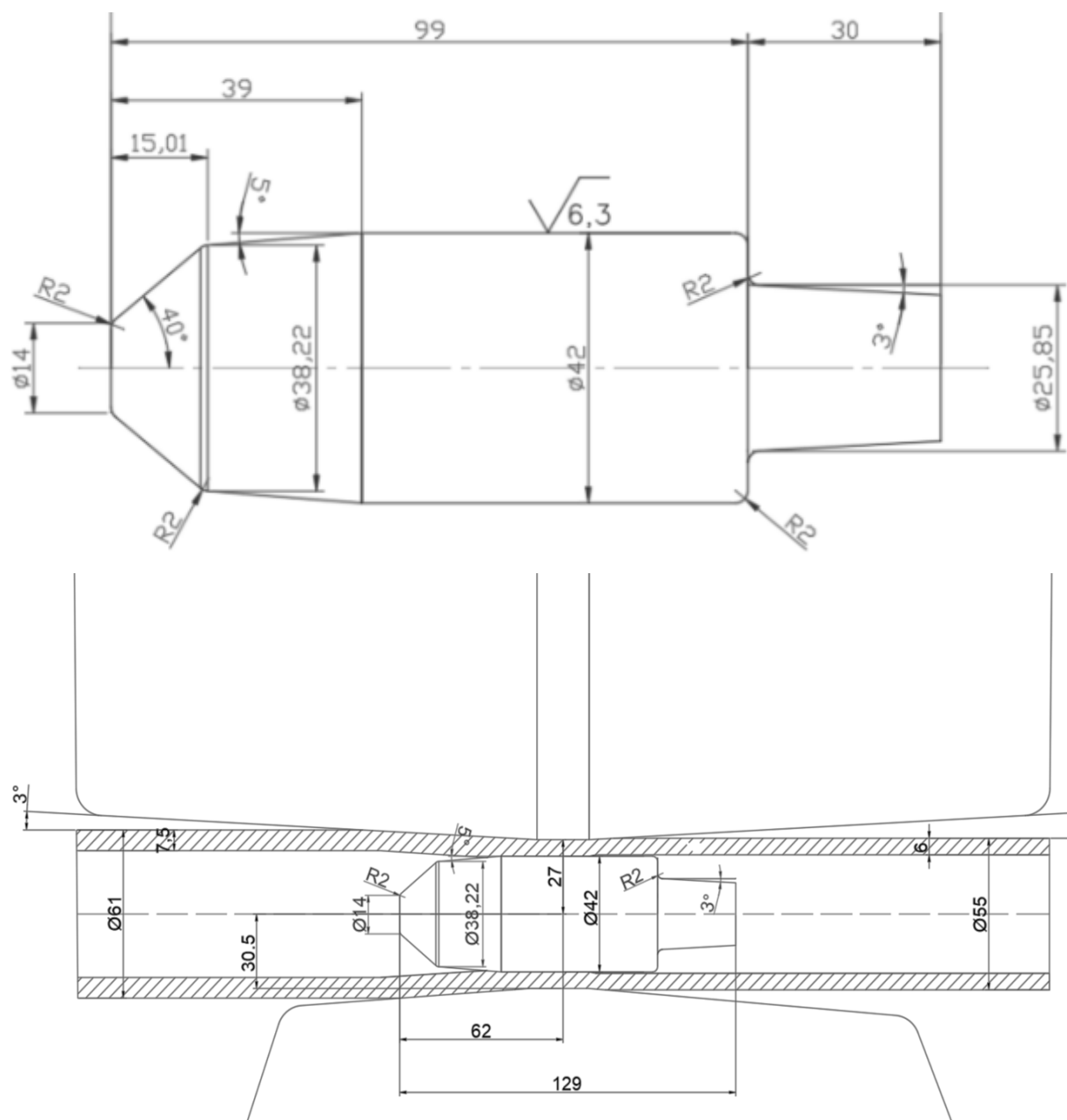


Рисунок 3.7. Геометрические размеры раскатной оправки диаметром 42 мм и очаг деформации при раскатке гильзы $D_r \times S_r = 62 \times 8$ мм в трубу $D \times S = 55 \times 6$

мм

По второму маршруту прокатки, полученные прошитые гильзы на оправках диаметром 43,5 мм раскатали в трубы размерами 55х6 мм. Раскатка осуществлялась партиями из 8 труб на оправках, изготовленных из сталей 4Х5МФС, 3Х3МЗФ, 5Х3ВЗМФС (ДИ 23), 20Х2Н4А.

Перед прокаткой для создания на поверхности слоя окалины, служащей своеобразной смазкой при физическом контакте с прокатываемым металлом все рабочие оправки подвергались термообработке. Перед раскаткой прошитые гильзы нагревали до температуры обработки 1150...1160°С в электронагревательной печи (рисунок 3.8). Длительность нагрева составляла для заготовок из стали 20Х13 примерно 60 мин.



Рисунок 3.8 - Электропечь с нагреваемыми гильзами из стали 20Х13

Раскатка протекала стабильно при угле подачи валков 14° с частотой вращения рабочих валков 30 об/мин. После раскатки трубы направлены к охлаждению на воздухе до комнатной температуры. Цикл прокатки одной заготовки в среднем находился в интервале от 1,5 до 2 мин. Подачу прошитых гильз в стан и выдачу труб с выходной стороны осуществляли вручную. После

каждой партии рабочие валки, оправку и линейки подвергали охлаждению водой. На рисунке 3.9 представлены фотографии наружного вида и внутренней поверхности горячекатаных труб из коррозионной стали 20Х13 после прокатки на стане МИСиС 130Д.

Таблица 3.3 – Параметры настройки стана для процессов раскатки

Маршрут	Диаметр оправки $D_{опр}$, мм	Диаметр гильзы $D_г$, мм	Толщина стенки гильзы $S_г$, мм	Расстояние между валками $B_в$, мм	Расстояние между линейками $L_л$, мм	Диаметр трубы $D_т$, мм	Толщина стенки трубы $S_т$, мм
I (1–5)	50	70	9	61	66	62	6
II (1–40)	42	61	7.5	54	61	55	6



а)



б)



Рисунок 3.9 - Внешний вид исходных гильз (а), и труб после раскатки (б, в) из стали 20Х13

Последняя заготовка заторможена в стане путем отключения электродвигателей главного привода на установившейся стадии раскатки (рисунок 3.10).

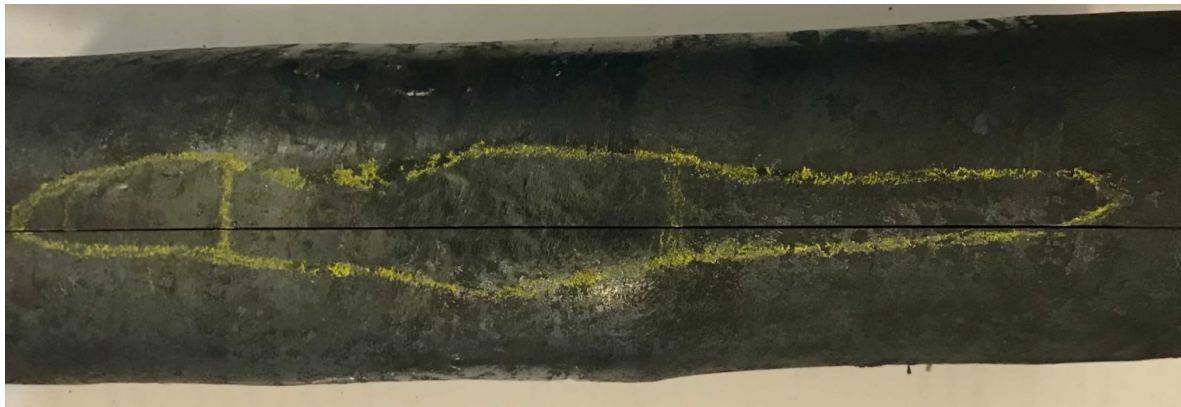


Рисунок 3.10 – Заторможенный образец гильзы-трубы в процессе раскатки

После прокатки и охлаждения на воздухе проводили осмотр состояния наружной и внутренней поверхности, и также измерение геометрических размеров труб. Замера диаметральных размеров исходных гильз и полученных труб проведена на передней, задней и средней частях труб по вышеприведённой схеме. Для определения толщины стенки проводили измерения на входном и на выходном сечениях.

3.2 Точность геометрических параметров гильз и труб

Визуальный осмотр полученных труб с указанными в таблице 3.3 геометрическими размерами в результате опытных прокаток на разных оправках показал, что дефекты наружной и внутренней поверхности отсутствуют. Для оценки точности при раскатке по режиму, предлагаемому с целью обеспечения минимального износа оправок, и получения высококачественных труб проводили статистическую обработку результатов измерения толщины стенки прошитых гильз и труб после раскатки.

Согласно представленным данным в таблице 3.3, поперечная разностенность полученных труб по двум маршрутам находилась в пределах 1,8...3,5% (рисунок 3.11). Также установлено, что с ростом разностенности гильз после прошивки происходит увеличение разностенности труб. Отмечено, что при разностенности гильз до 4,5% получили трубы после раскатки по приведенному режиму с разностенностью в пределах 1,8...3%, а при разностенности гильз 5% разностенность труб увеличивается до 3,5%. Данные результаты о разностенности труб из коррозионностойких сталей после раскатки на стане МИСиС 130Д позволяют обеспечивать высокую точность и качество полученных труб, и согласуются с данными работ, полученными при прокатке на станах винтовой прокатки [35].

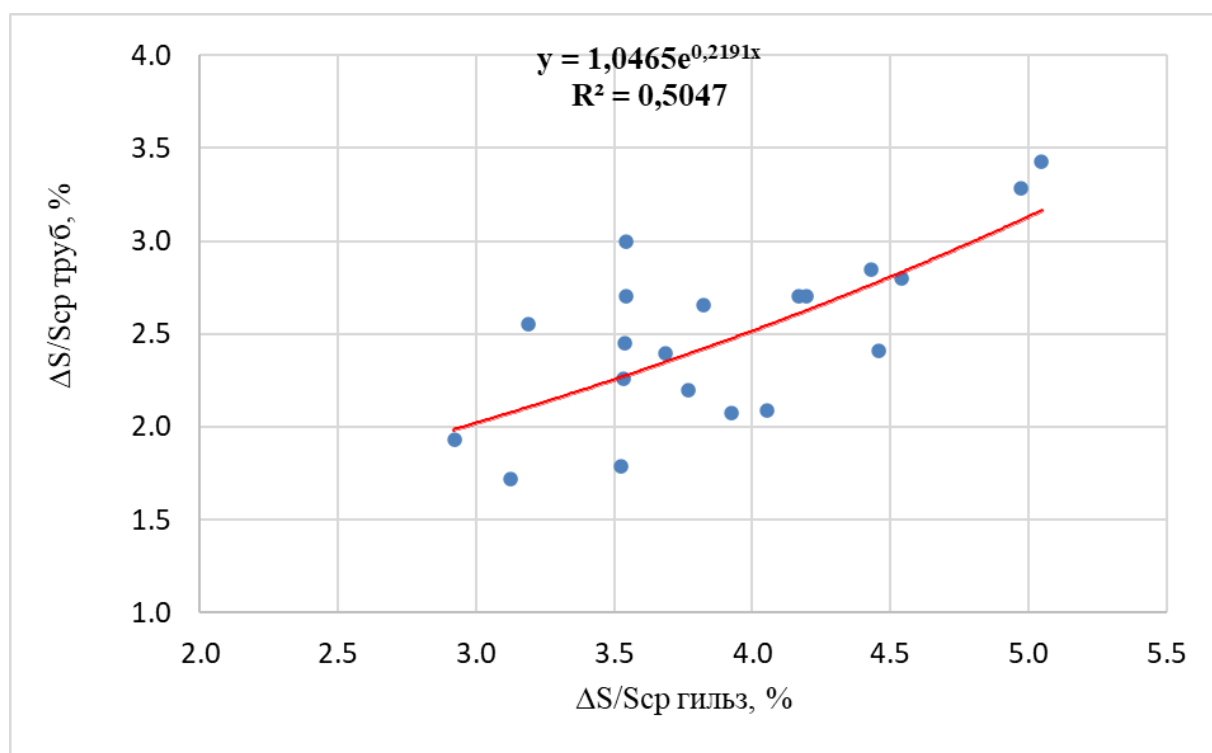


Рисунок 3.11 – Зависимость разностенности труб от разностенности прошитых гильз

Таблица 3.4 – Геометрические размеры исходных гильз и труб

Номер трубы	Диаметр гильз D _г , мм	Толщина стенки гильз S _г , мм	Абсолютная погрешность ΔS, мм	Относительная погрешность δ _г , %	Диаметр труб D _г , мм	Толщина стенки труб S _{т_ср} , мм	Абсолютная погрешность Δ _т , мм	Относительная погрешность δ _т , %
I. Раскатка на оправке диаметром 50 мм								
1	70.3	7.6	0.3	3.5	65.5	6.5	0.1	1.8
2	71.5	8.5	0.3	3.1	65.9	6.8	0.1	1.7
3	70.7	8.4	0.3	3.2	65.6	6.5	0.2	2.6
4	70.4	7.5	0.3	3.8	65.6	6.4	0.1	2.2
5	70.4	7.5	0.3	3.5	65.4	6.5	0.2	2.5
II. Раскатка на оправках диаметром 42 мм								
8	61.4	7.3	0.3	4.5	56.9	5.7	0.2	2.8
10	61.2	7.3	0.3	3.7	56.9	5.6	0.1	2.4
12	61.4	7.2	0.2	2.9	56.8	5.6	0.1	1.9
14	61.4	7.3	0.4	5.0	57.0	5.6	0.2	3.4
16	61.2	7.4	0.3	4.1	56.6	5.6	0.1	2.1
18	61.6	7.2	0.3	4.2	56.7	5.6	0.1	2.7
20	61.4	7.3	0.3	3.5	56.8	5.6	0.2	3.0
29	61.1	7.2	0.3	4.4	57.0	5.6	0.2	2.8
27	61.4	7.4	0.3	3.9	56.9	5.6	0.1	2.1
25	61.4	7.4	0.3	3.5	56.9	5.5	0.1	2.3
23	61.0	7.2	0.4	5.0	57.0	5.6	0.2	3.3
21	61.4	7.4	0.3	4.2	57.1	5.6	0.2	2.7
32	61.3	7.3	0.3	3.5	56.8	5.6	0.2	2.7
34	61.1	7.3	0.3	3.8	56.7	5.7	0.2	2.7
40	61.2	7.2	0.3	4.5	56.7	5.5	0.1	2.4

3.3 Качество внутренней поверхности труб

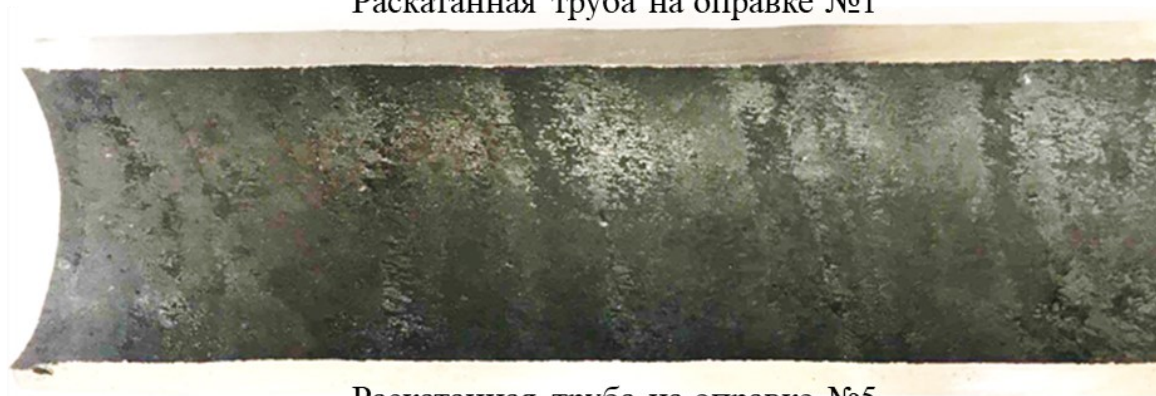
В ходе выполнения исследования проведена оценка качества внутренней поверхности труб из коррозионностойкой стали 20Х13 после раскатки по выше представленному режиму на разных оправках. На рисунках 3.12 – 3.15 представлены соответственно разрезы гильз, труб после раскатки на оправках №1, 5 и заторможенной заготовки, на которых проведен замер шероховатости их внутренней поверхности с помощью профилометра TR200 Roughness Tester. Результаты измерения шероховатости внутренней поверхности образцов внесены в таблицу 3.5.



Рисунок 3.12 – Внутренняя поверхность гильз перед раскаткой



Раскатанная труба на оправке №1



Раскатанная труба на оправке №5

Рисунок 3.13 – Внутренняя поверхность труб после раскатки на оправках



Рисунок 3.14 – Разрез заторможенной заготовки с оправкой

По полученным результатам видно, что после раскатки качество внутренней поверхности труб улучшается. Среднее значение величин шероховатости R_a и R_z на внутренней поверхности соответственно изменяется в пределах 4,5...5 мкм, и 26...30 мкм для гильз, а на внутренней поверхности труб после раскатки на разных оправках они находятся в интервале 3...3,5 мкм и 15...20 мкм.

Таблица 3.5 – Шероховатость внутренней поверхности гильз и труб

№ попытки измерения			1	2	3	4	5	6	7	8	среднее значение
Гильзы	№37	Ra, мкм	2.725	3.215	5.243	6.917	6.328	4.967	6.371	3.423	4.899
		Rz, мкм	17.62	19.07	24.35	38.87	31.8	25.06	40	18.15	26.865
	№56	Ra, мкм	3.528	3.931	6.097	4.696	4.554	4.569	4.906	5.733	4.752
		Rz, мкм	21.79	23.58	31.05	33.38	24.52	24.46	26.76	36.78	27.790
	заторможенная	Ra, мкм	4.957	5.256	4.53	5.48	5.64	4.309	4.91	4.901	4.998
		Rz, мкм	23.82	25.31	22.61	29.36	32.07	22.12	28.81	28.2	26.538
Трубы	Раскатанная	Ra, мкм	2.915	2.261	4.481	4.781	2.37	2.02	5.385	4.098	3.539
		Rz, мкм	17.26	15.42	25.21	25.94	17.5	12.15	29.13	23.15	20.720
	Раскатанная	Ra, мкм	2.187	2.816	1.942	2.787	3.298	4.78	5.628	2.325	3.220
		Rz, мкм	14.75	17.39	10.39	15.25	18.82	23.2	29.36	15.58	18.093
	заторможенная	Ra, мкм	3.18	3.87	3.035	2.431	3.813	3.223	2.253	2.432	3.030
		Rz, мкм	18.65	21.07	20.02	16.87	25.33	18.52	15.32	16.53	18.998

Для оценки влияние состояния рабочей поверхности оправок на качество получаемых труб проведен замер по указанной в рисунке 3.15 схеме, шероховатости рабочей поверхности оправок №1, 3, 5 и пробной оправки на заторможенной заготовке.

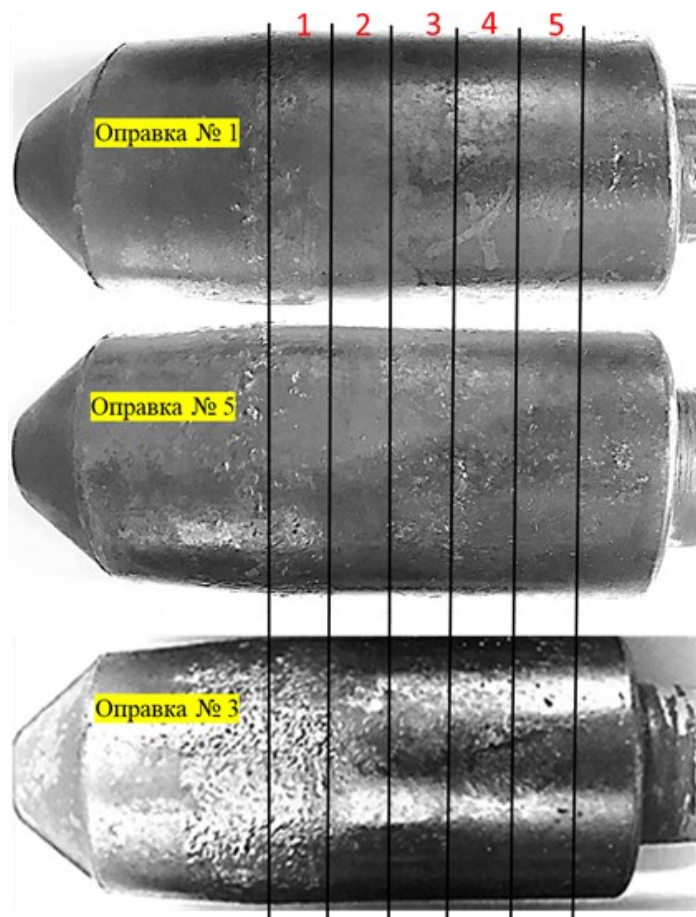


Рисунок 3.15 – Замер шероховатости разных оправок по их рабочей поверхности

На основе дынных измерений построили графики, изображающие средние величины шероховатости рабочей поверхности оправок на их цилиндрической части. Средняя величина шероховатость R_a на рабочей поверхности оправки в заторможенном образце составила 0,5 мкм, при этом на рабочей поверхности оправок №5, 1 и 3 после раскатки партиями из 8 труб их среднее значение данной величины соответственно составило от 0,8...2 мкм.

Согласно указанным данным в таблице 3.5 и на рисунке 3.16 поверхность заторможённой трубы имеет наиболее гладкое состояние в соответствии с низкой шероховатостью рабочей поверхности новой оправки.

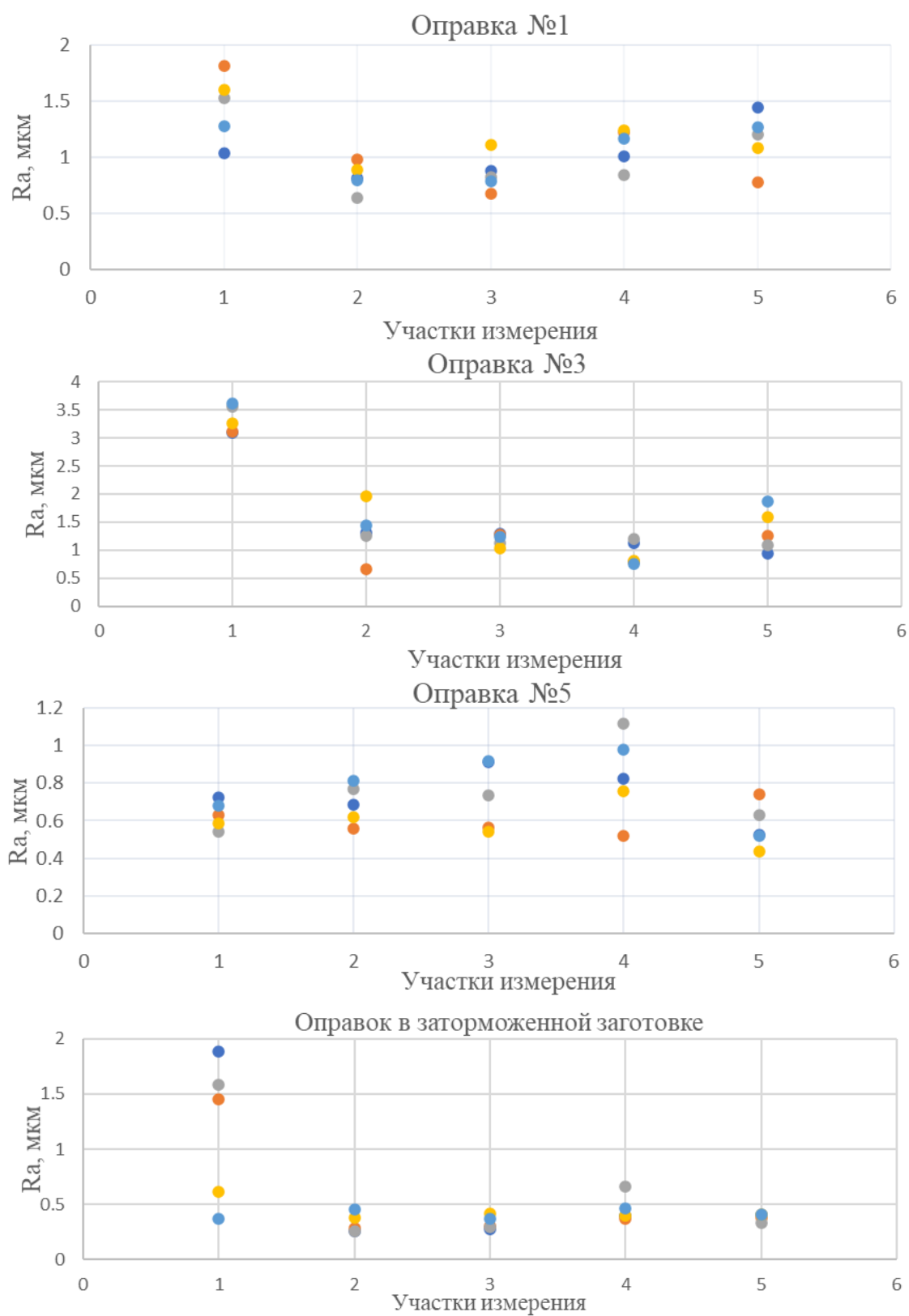


Рисунок 3.16 – Состояние рабочей поверхности оправок на цилиндрической части

Внутренняя поверхность трубы, полученной раскаткой на оправке №5 после 8 проходов имеет среднее значение шероховатость R_a , равное 3,2 мкм, в соответствии с тем, средние значения неровности высоты профиля рабочей поверхности оправки составили $R_a = 0,8$ мкм, $R_z = 18$ мкм. Средняя шероховатость R_a по рабочей поверхности оправки №1 после раскатки 8 труб из стали 20Х13 составляет 1,2 мкм, в то время состояние внутренней поверхности последней из раскатанных на ней труб ухудшалось по сравнению с трубой, полученной раскаткой на оправке №5. Величины шероховатости R_a и R_z , зафиксированные на поверхности имеют средние значения, равные 3,5 и 20 мкм соответственно. Исходя из изложенных результатов следует отметить, что качество внутренней поверхности труб снижается с ухудшением состояния рабочей поверхности оправок. Установлено, что увеличение шероховатости рабочей поверхности оправки вызывает снижение гладкости поверхности полученных на ней труб.

3.4 Кинематические и энергосиловые параметров

В ходе выполнения исследования процесса раскатки труб из коррозионностойкой стали 20Х13 на стане МИСиС 130Д фиксировали кинематические и энергосиловые параметры. Для определения коэффициентов осевой и тангенциальной скоростей определяли машинное время раскатки гильз, длину шага винтовой линии на заторможенной гильзе-трубе. После раскатки трубы охлаждали на воздухе и определяли распределение шагов винтовой линии по длине. Кроме шагов винтовой линии $S_{\text{шаг}_T}$ фиксировали их геометрические параметры труб D_T и S_T , силу тока на электродвигателях главного привода стана (I) и площадь контактной поверхности заторможенной гильзы-трубы с валками (F), на основании которых производили расчеты мощности раскатки (N) и усилия металла (P) на валок стана МИСиС 130Д.

Также на «заторможенной» заготовке определяли фактическое расстояние между валками в пережиме и расстояние между линейками. В результате измерения параметров деформации на заторможенной гильзе-трубе получили: диаметр гильзы 62 мм, толщину стенки 7,5 мм, диаметр трубы 55 мм, толщину стенки трубы 5,5...5,7 мм. Длина контакта заготовки с линейками составляет 74 мм, шириной 47...48 мм, а длина контакта заготовки с валками находится в пределах 184...186 мм, с шириной 23...25 мм (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17 Площадь контактной поверхности заторможенной заготовки

Для оценки кинематических параметров процесса раскатки труб на оправке определили условный коэффициент осевой и тангенциальной скорости.

Из определения отношения коэффициентов скоростей имеем выражение:

$$tg\beta_{эксн} = \frac{\eta_0}{\eta_T} \cdot tg\beta \quad (3.1)$$

Из параметров траекторий, фиксируемых на поверхности трубы:

$$tg\beta_{эксн} = \frac{S_{шаг_\Gamma}}{\pi \cdot d_z}, \quad (3.2)$$

где $S_{шаг_\Gamma}$ - шаг винтовой линии за оборот.

Коэффициент осевой скорости металла при вращении валков возможно определить следующим образом:

$$\eta_0 = \frac{V_\phi}{V_T}, \quad (3.3)$$

где фактическая скорость раскатки $V_\phi = \frac{l_\Gamma}{(t-t_{зан})}$, $t_{зан}$ – время заполнения очага деформации; V_T – осевая скорость процесса прокатки в пережиме валков, которая определяется теоретически по следующей формуле:

$$V_T = \frac{\pi \cdot D_B \cdot n \cdot \cos \beta}{60}, \quad (3.4)$$

где D_B – диаметр валков в пережиме; n – частота вращения валков, об/мин; β – угол подачи валков.

Из уравнений (3.3) и (3.4) получили коэффициент осевой скорости следующим образом:

$$\eta_0 = \frac{60 \cdot V_\phi}{\pi \cdot D_B \cdot n \cdot \cos \beta} \quad (3.5)$$

Поставляя формулу (3.5) в (3.2), получили коэффициент тангенциальной скорости, имеющий выражение:

$$\eta_T = \frac{60 \cdot d_r \cdot l_r}{D_B \cdot n \cdot \cos \beta \cdot s_{\text{шаг}_T} \cdot (t - t_{\text{зап}})} \quad (3.6)$$

На основании исходных и измеренных данных на заторможенной заготовке получены фактический коэффициент осевой скорости при раскатке гильз из стали 20Х13 равным 0,53 и 0,69 для коэффициента тангенциальной скорости.

Усилие металла на валки P определяли по формуле

$$P = P_{\text{ср.2}} \cdot (F_1 + F_2) + P_{\text{ср.3}} \cdot F_3, \quad (3.7)$$

где F_1 , F_2 , F_3 – площадь контактной поверхности на участках редуцирования от сечения входа металла в валки, обжатия при раскатке от сечения вторичного захвата до сечения отрыва стенки трубы от оправки, и обкатки от последнего до сечения выхода трубы из валков соответственно;

$P_{\text{ср.1}}$, $P_{\text{ср.2}}$, $P_{\text{ср.3}}$ – значения среднего удельного усилия на участках редуцирования от сечения входа металла в валки, обжатия при раскатке от начала вторичного захвата до сечения отрыва стенки трубы от оправки, и обкатки от последнего до сечения выхода трубы из валков соответственно.

Значения средних давлений рассчитывали по методике А. П. Чекмарева и других по следующим формулам:

$$P_{\text{ср}} = \left(1,8 - \frac{b_{\text{п}}}{2r_{\text{п}}}\right) (1 - 2,7 \cdot \varepsilon_{\text{п2}}) \sigma_u, \quad (3.8)$$

где $b_{\text{п}}$ – ширина контактной поверхности в сечении пережима;

r_{π} – радиус заготовки в пережиме (измеряли на заторможенной заготовке);

ε_{π} – относительное обжатие заготовки в пережиме;

σ_u –сопротивление деформации металла заготовки при заданной температуре 1200 °С и скорости деформации $1 \cdot \text{сек}^{-1}$, для стали 20Х13 принимали $\sigma_u = 105$ МПа.

Тогда

$$P_{\text{cp}} = \left(1,8 - \left(\frac{25}{54}\right)\right) \cdot (1 - 2,7 \cdot 0,12) \cdot 105 = 94,9 \text{ МПа.}$$

Средние давления на участке раскатки гильзы на оправке принимаем по соотношению

$$P_{\text{cp}2} \approx 0,75 P_{\text{cp}1} = 0,75 \cdot 94,9 = 71,18 \text{ МПа.}$$

Средние давления на участке обкатки гильзы

$$P_{\text{cp}3} \approx 0,1 P_{\text{cp}1} = 0,1 \cdot 94,9 = 9,49 \text{ МПа.}$$

На основании данных, полученных в результате измерения на заторможенной заготовке пятна контактной площади, используя AutoCAD в качестве инструмента для определения общей площади контакта, и также каждого участка. Средние значения площади каждого участка составляют: $F_1 = 681,7 \text{ мм}^2$; $F_2 = 1417 \text{ мм}^2$; $F_3 = 551,9 \text{ мм}^2$. Суммарное усилие P_{Σ} , действующее на валок, (рассчитываются по формуле 3.7) составляет примерно 154,71 кН. Крутящий момент M при известной частоте вращения валков определяется по следующей формуле:

$$M = \frac{1}{2} \cdot P \cdot b_{\pi} \cdot \left(1 + \frac{D}{d_{\pi}}\right) \quad (3.9)$$

где $D_{\text{в}}$ и d_{π} – диаметр валков и трубы в пережиме соответственно.

Приняв в расчет ширину контактной поверхности равную в среднем 0,022 м, а диаметр валков и раскатываемой трубы равные 0,415 м и 0,054 м соответственно, получили крутящий момент при частоте вращения валков 30 об/мин $M = 16,8$ кН.м. Исходя из полученного значения крутящего момента, определена мощность привода на каждый двигатель по выражению:

$$N = \frac{M \cdot n}{9549}, \quad (3.10)$$

Установлено, что мощность двигателя для привода одного валка составила 45,74 кВт.

С другой стороны, во время выполнения исследования были зафиксированы энергосиловые параметры, и установлено, что токовая нагрузка на каждый двигатель при раскатке гильз из стали марок 20Х13 размерами 61х7,5 мм в трубы 55х6 мм составила 330 А, из них 230 А – ток холостого тока. В итоге рабочий ток двигателя при раскатке составляет 100 А, что с учетом напряжения 380 В и характеристики привода $\cos\phi$ равном 0,7 определяет мощность, величина которой получается приблизительно 46 кВт. И крутящий момент валков при данном случае составляет примерно 14,67 кН.м.

Исходя из вышеизложенного результата энергосиловых параметров, видно, что величины полученные расчетом с применением площади пятна контактной поверхности с валками сходятся со значениями, зафиксированными во время проведения экспериментальных прокаток с незначительным разбросом. Разница полученных мощностей привода двигателя составляет 1 %, а различия в величине крутящего момента на валок 12 %.

Для сравнения полученных значений усилия было проведено моделирование процесса прошивки в программном комплексе Qform. Параметры настройки очага деформации соответствовали параметрам,

указанным в таблице 3.3. В качестве материала исходной заготовки выбран материал 20Х13 с характеристиками сопротивления деформации, взятыми из данных материалов программного комплекса Qform.

По результатам моделирования получен график усилия металла, действующего на валок прокатного стана, которое составило 120–140 кН (рисунок 3.18).

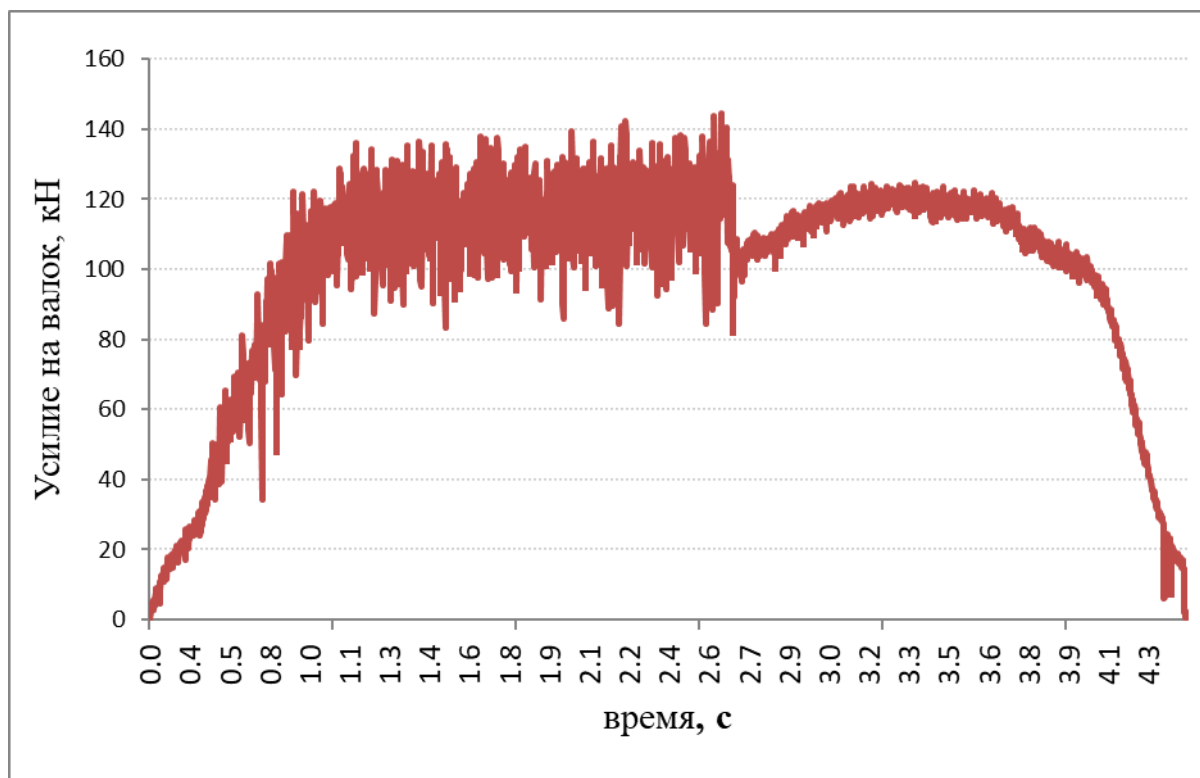


Рисунок 3.18 - График радиального усилия металла на валок

На рисунке 3.19 представлена приближенная форма и размеры контактной поверхности валка с заготовкой на установившейся стадии прокатки гильз в трубы.

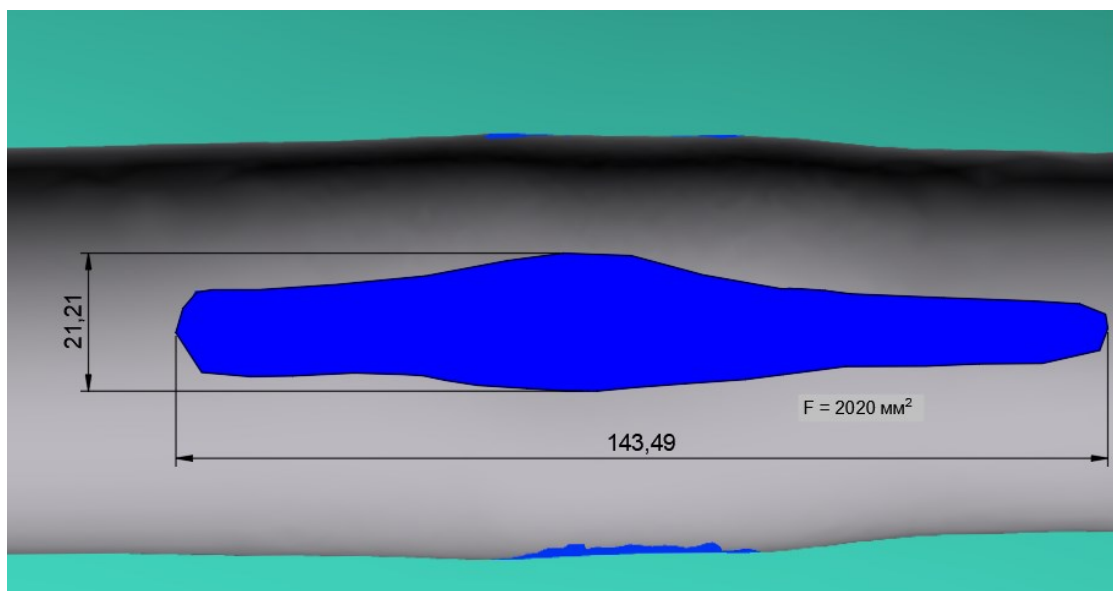


Рисунок 3.19 - Форма контактной поверхности по результатам моделирования процесса раскатки в Qform

Длина контакта составляет приблизительно 143,5 мм при ширине в пережиме 21,2 мм. Площадь контактной поверхности по результатам моделирования составила 2020 мм². Таким образом, разница полученных размеров контактной площади контакта на основе моделирования и экспериментально составляет 22 %, а различия в величине усилия металла на валок 9...23 %.

Выводы

В ходе исследования процесса раскатки труб на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д проведена опытная раскатка гильз в трубы из стали 20Х13.

Оценка точности полученных труб по двум маршрутам прокатки показала, что их разностенность находится в пределах 1,8...3,5%. Отмечено, что при разностенности прошитых гильз до 4,5%, разностенность труб после раскатки по применяемому режиму находится в пределе 1,8...3%, а

разностенность труб может повышаться до 3,5% при прокатке гильз с разностенностью 5%.

Проведена оценка качества внутренней поверхности труб после раскатки на разных оправках. Установлено, что улучшение состояние рабочей поверхности оправки при раскатке труб из коррозионностойких сталей позволяет повысить качество внутренней поверхности с уменьшением шероховатости на ней.

Основываясь на фактических токовых нагрузках в ходе экспериментальной раскатки, были определены энергосиловые параметры процесса раскатки с использованием заторможенной в очаге деформации заготовки, и реологических свойств стали 20X13. Проведено сравнительное моделирование процесса раскатки в программе Qform, что позволяет оценить точность результатов, получаемых конечно элементным моделированием.

Коэффициент осевой скорости при раскатке составил 0,53. Низкая величина коэффициента осевой скорости металла на выходе из очага деформации при прокатке коррозионностойких сталей марок 20X13, может объясняться повышенным скольжением металла. При этом увеличивается время прокатки. Очевидно, что вопрос повышения коэффициента осевой скорости вызывает необходимость специальных подходов для успешного, и эффективного освоения технологии прокатки труб из стали 20X13.

4. Экспериментальное исследование

4.1 Износ оправки при раскатке коррозионностойкой стали 20Х13

Известно, что одним из проблемных аспектов при прокатке труб из коррозионностойких марок сталей является низкий ресурс работы оправок и направляющего инструмента. Это связано с износом рабочей поверхности, влияющим на стабильность процесса, качество внутренней поверхности и точности получаемых труб. Работоспособность оправки при прокатке характеризуется ее материалостойкостью, величина которой оценивается отношением массы прокатанной заготовки к изношенной массе металла оправки.

В ходе исследования были взвешены на электронных весах с точностью до 0,001 кг гильзы и оправка в начальном состоянии с окалиной и после осуществления 5 проходов (рисунок 4.1). Результаты измерения показали, что при раскатке 5 гильз из коррозионностойкой стали 20Х13 весом 69 кг, масса оправки уменьшилась на 0,002 кг. Масса указана без учёта количества налипшего металла на рабочую поверхность оправки. Величина материалостойкости при раскатке составила 34,5 т/кг.

При визуальном осмотре обнаружено, что зона начала контакта оправки с прокатываемым металлом сопровождается незначительным его налипанием на рабочую поверхность. В ходе исследования проведено измерение диаметральных размеров оправки по поперечным сечениям микрометром с точностью 0,01 мм. Результаты измерения оправки до и после раскатки представлены на рисунке 4.2. Средний диаметр оправки после окислительного отжига, который предназначен для образования на поверхности оксидного слоя на цилиндрической части составил 49,33 мм. После осуществлении прокатки труб по первому маршруту оправка подверглась незначительному

износу в пережиме очага деформации, ее диаметр в рабочей части уменьшился максимально на 0,04 мм (рисунок 4.3). На основе полученных результатов построен график распределения глубины износа рабочей поверхности оправки (рисунок 4.3).

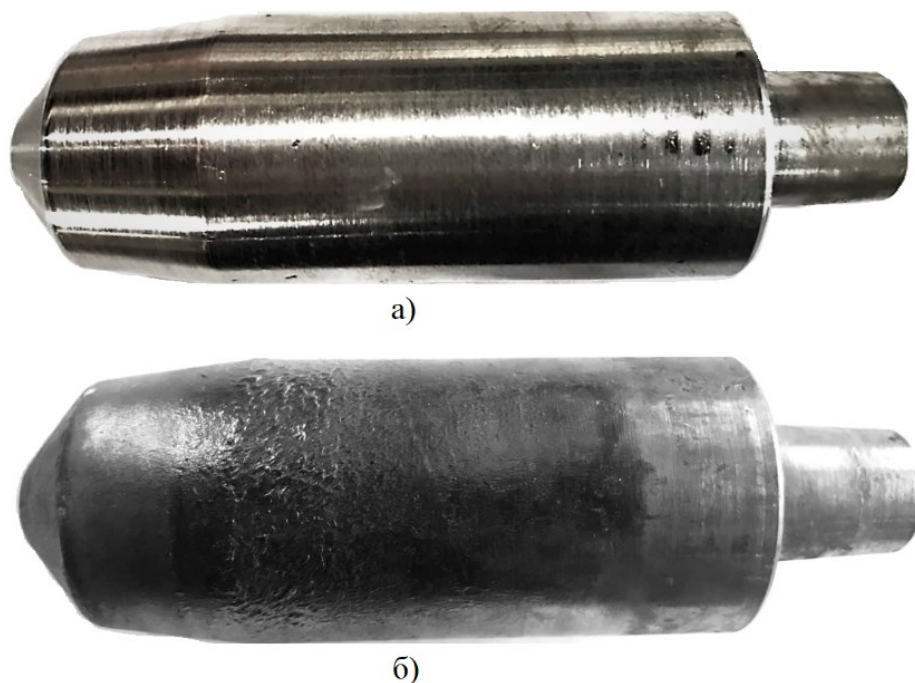


Рисунок 4.1 - Внешний вид оправки

а) до прокатки; б) после 5 прокатанных труб

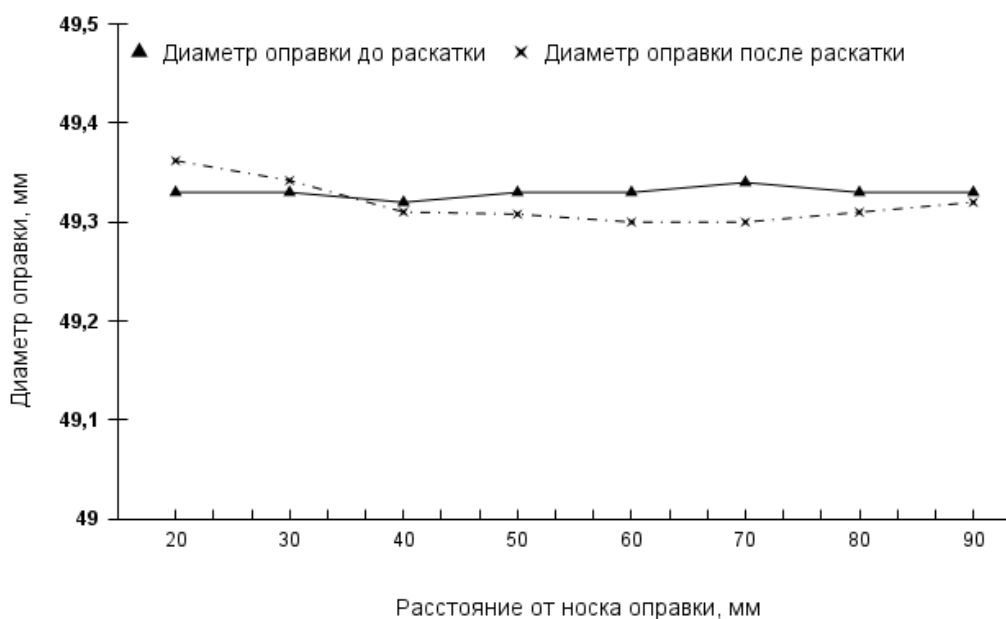


Рисунок 4.2 - Диаметральные размеры оправки до и после раскатки

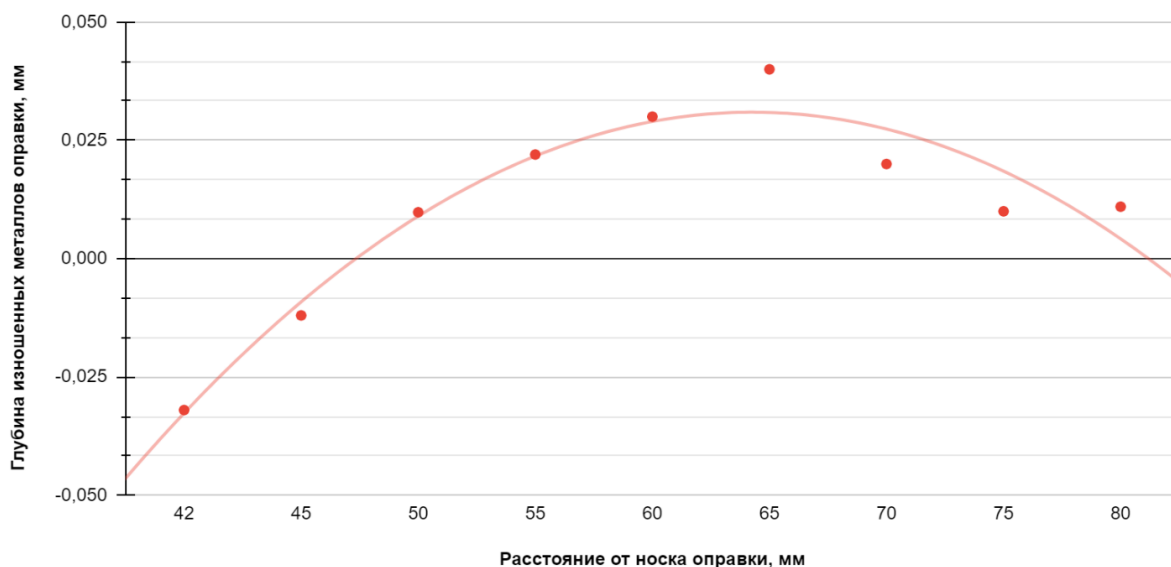


Рисунок 4.3 - Глубина износа оправки по длине

Для сравнения полученных значений проведено моделирование процесса раскатки труб из стали 20X13 в программном комплексе Qform с учетом параметров экспериментальной прокатки. Характеристики сопротивления деформации стали марок 20X13 для моделирования взяты из базы данных библиотек материалов Qform. Основываясь на полученных результатах моделирования, был построен график, распределения износа оправки по длине, от её носка, в зависимости от количества прокатанных труб (рисунок 4.4). В пережиме очага деформации получили максимальное значение износа незначительно больше по сравнению с результатом, полученным в ходе эксперимента. На основании результатов моделирования определили изменение материалостойкости оправки в зависимости от прокатанных труб. Установлено, что рабочий ресурс оправки при раскатке труб из стали 20X13 заметно уменьшается с увеличением количества проведенных прокаток. Материалостойкость оправки после одной прокатанной трубы составила 72,55 т/кг и уменьшается до 15,27 т/кг после 5 прокатанных труб.

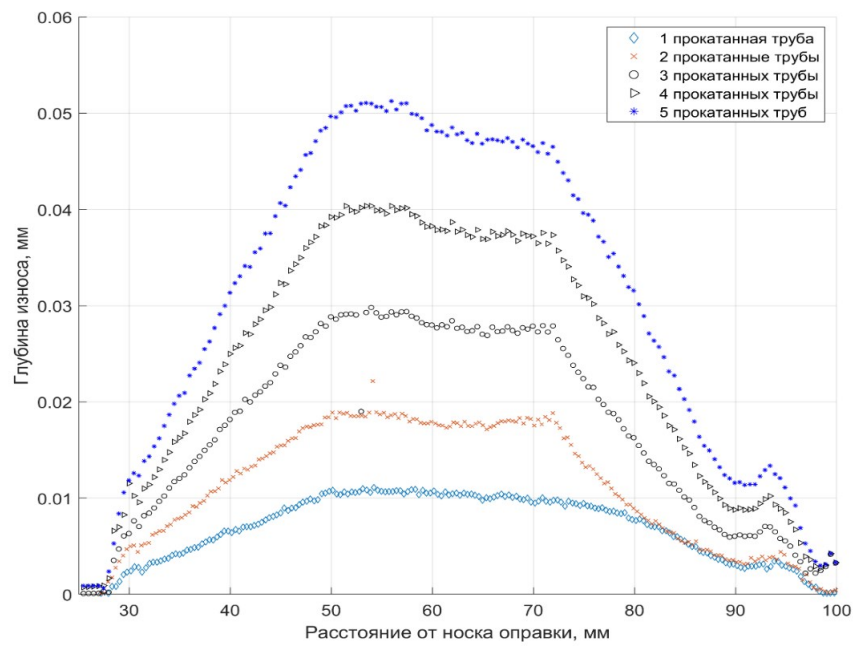


Рисунок 4.4 - Распределение глубины износа оправок по длине в зависимости от количества прокатанных труб

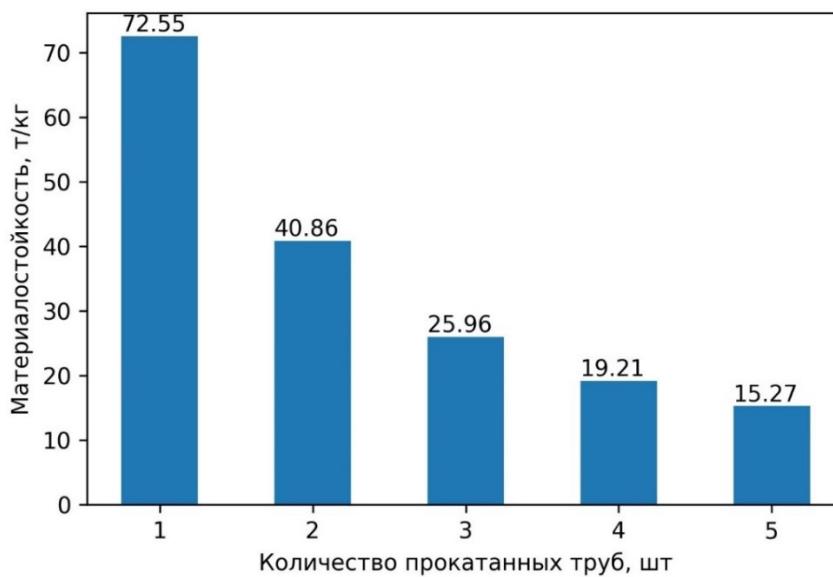


Рисунок 4.5 - Изменение величины материалостойкости оправок в зависимости от количества прокатанных труб

Большой разброс по величине материалостойкости оправок при сравнении с экспериментальными данными может объясняться отсутствием налипания металла на поверхность оправки при моделировании в Qform.

4.2 Исследование влияния материала оправок на их износ при раскатке труб из стали 20Х13

Основными факторами, которые оказывают значительное влияние на износостойкость оправок, являются: контактное время оправок с прокатываемым металлом, материал заготовки и инструмента. Известно, что одним из основных видов повреждения оправок при прокатке труб из коррозионностойких марок стали является налипание деформируемого металла. Одним из эффективных способов борьбы с налипанием является подбор материала инструмента, который обладает низкой склонностью к схватыванию с деформируемым металлом. Положительные результаты могут быть достигнуты также путем термической обработки рабочего инструмента перед эксплуатацией для создания защитного слоя окислов [69,89,96,99,120], а также нанесением на его поверхность защитных покрытий [95,98,100,121].

В рамках работы рассмотрено влияние материалов, из которых изготовлены оправки при прокатке труб из стали 20Х13 на их износостойкости. Для прокатки труб испытывали оправки, изготовленные из сталей 4Х5МФС, 3Х3М3Ф, 5Х3В3МФС (ДИ 23) и 20Х2Н4А. Их значения углеродного эквивалента представлены в таблице 4.1, которые определяются по следующей формуле.

$$C_{\text{э}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2} \quad (4,1)$$

Таблица 4.1 – Исследуемые оправки

№	Марка стали	$C_{\text{эКВ}}$
1	4Х5МФС	2,05
2	3Х3М3Ф	1,94
3	5Х3В3МФС	1,69
4	20Х2Н4А	0,76
5	20Х2Н4А (с нанесенными покрытиями)	-

Согласно изложенному в предыдущей главе, перед прокаткой оправки подвергали выдержке в камерной электрической печи при $T = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 60 минут для образования тонкого оксидного слоя на рабочей поверхности. На поверхность одной из оправок, изготовленных из 20Х2Н4А нанесли покрытие, состоящие из дисперсных частиц алюминия и его оксида методом холодного газодинамического напыления низкого давления (ХГННД) с использованием установки динамической металлизации ДИМЕТ 405, у которой присоединено сопло СК20 со сменной вставкой диаметром 6 мм (рисунок 4.6). Расход напыляемого порошка находился в пределах от 0,3 до 0,4 г/с. Дистанция напыления от среза сопла до поверхности подложки составляла 15 мм. В качестве рабочего газа применялся сжатый воздух с рабочим давлением равным 0,9 МПа.

Процесс напыления проводился при режиме нагрева в пределах 400–450 °С. Под давлением сжатый воздух от компрессора ускоряется и дополнительно нагревается расположенным в распылителе нагревателем. Мелкодисперсные порошки подаются в сопло и формируется сверхзвуковой поток разгоняемых частиц порошка, и которые осаждаются при их ударе на поверхности оправки. В качестве напыляемого материала использовалась коммерческая порошковая смесь А-10-1(рисунок 4.7) на основе алюминия и его оксида, полученная из Обнинского центра порошкового напыления (ОЦПН).



Рисунок 4.6 –ДИМЕТ - 405

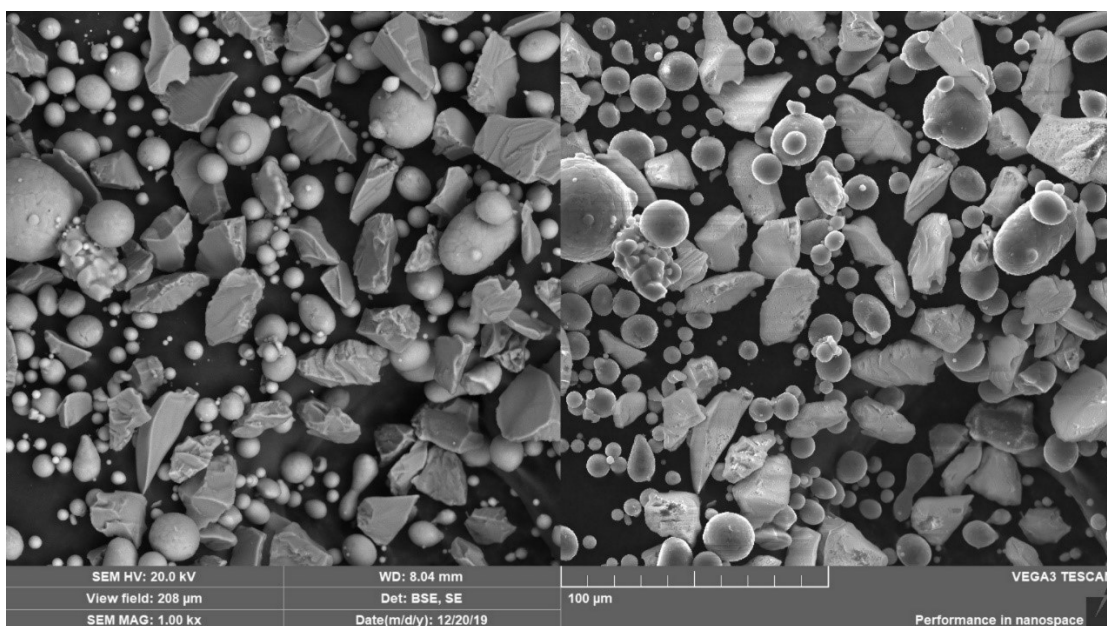


Рисунок 4.7 – Микроструктура порошков для нанесения покрытий методом ХГН

Внешний вид термообработанных оправок после механической обработки и после термической обработки представлен на рисунке 4.8. Осмотр внешнего вида оправок до и после термообработки показал, что после отжига на поверхности оправок образовался слой оксидов, который при прокатке

позволяет создавать дополнительное сопротивление теплопередаче между рабочей поверхностью и прокатываемым металлом. Дополнительно данный слой выполняет роль смазки, снижая трение на поверхности контакта.



Рисунок 4.8 – Исследуемые оправки: до и после термообработки и нанесения покрытий ХГН

На каждой оправке проводили раскатку двух гильз, после чего оправки подвергали резкому охлаждению водой до комнатной температуры. Далее процесс раскатки повторялся. До и после прокатки пары труб фиксировалась масса оправок и геометрические размеры с фотофиксацией.

Внешний вид оправок после двух и четырех раскатанных трубы представлен на рисунке 4.9. Визуальный осмотр показывает, что на оправке из стали 5Х3В3МФС (ДИ 23) наблюдалось значительное налипание прокатываемого металла после двух прокатанных трубы. Меньшее количество налипавшего металла наблюдается на оправках, изготовленных из сталей 20Х2Н4А, 3Х3М3Ф. Также отмечено, что металл заготовки схватывается в основном на переходной зоне от конусной к цилиндрической части оправок. После прокатки первой партии на оправке, изготовленной из стали 4Х5МФС наблюдалось наилучшее состояние поверхности. Лишь присутствовало незначительное налипание.

Внешний вид оправок после прокатки 4-х труб (рисунок 4.9 - б) показал, что количество налипавшего металла на оправках из сталей 5Х3В3МФС, 3Х3М3Ф, и 20Х2Н4А существенно увеличивалось. На термообработанной оправке из 4Х5МФС, и оправке из 20Х2Н4А с нанесенным композиционным слоем появляется незначительное налипание металла. Несмотря на рост зоны налипания металла на рабочую поверхность форма оправок сохраняется с небольшими следами износа на поверхности.

Отмечено, что на оправке из стали 4Х5МФС после 6 и 8 прокатанных труб налипание металла не получило заметного развития, в отличие от оправок из других исследуемых материалов. Состояние рабочей поверхности других оправок продолжало ухудшаться, с образованием дефектов различного характера. Следы износа на оправках обнаружены также в пережиме очага деформации, но они не были критичными для дальнейшей работы оправок.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Внешний вид оправок после а) 2 прокатанной трубы; б) 4 прокатанных труб



Рисунок 4.10 – Внешний вид оправок после а) 6 прокатанных труб; б) 8 прокатанных труб

По результатам визуального осмотра можно отметить, что ни одна оправка существенно не изношена после проведения 8 раскаток. При этом суммарное время контакта рабочих поверхностей оправок с горячим металлом составило 40 с, осевое скорость прокатки 84 мм/с.

Следует отметить, что на рабочей поверхности оправки из стали 20Х2Н4А с нанесенным покрытием ХГН после 8 раскатанных труб следов износа и налипания прокатываемого металла практически не обнаружено.

Как отмечено выше, после раскатки труб на поверхности оправок наблюдается изнашивание, сопровождаемое уменьшением их диаметральных размеров рабочей поверхности. Данные о размерах оправок после прокатки каждой двух труб получены с применением представленного на рисунке 4.11 инструмента, точность измерения которого составляет $\pm 0,01$ мм.



Рисунок 4.11 – Инструмент для измерения размеров оправок

Зафиксированные значения диаметра оправок до и после прокатки представлены на графиках (рисунки 4.12, 4.13). В зоне пережима очага деформации наблюдалось уменьшение диаметров оправки после раскатки 8 труб с отсутствием схватывания прокатываемого металла на рабочей поверхности.

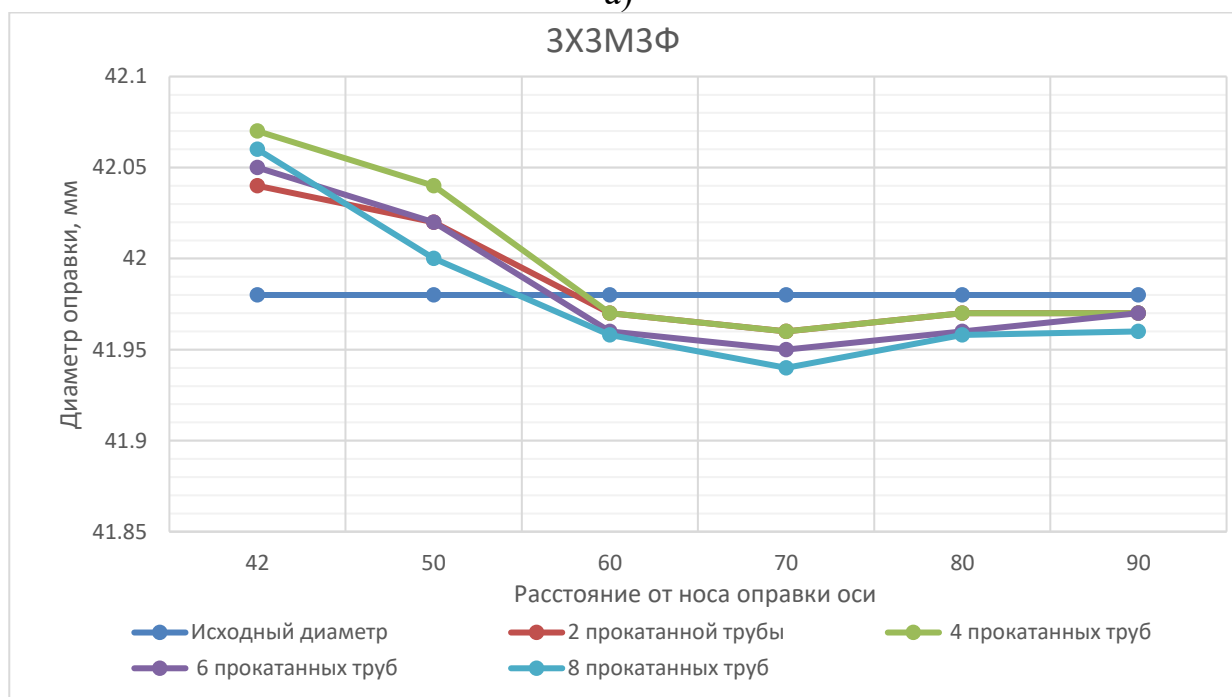
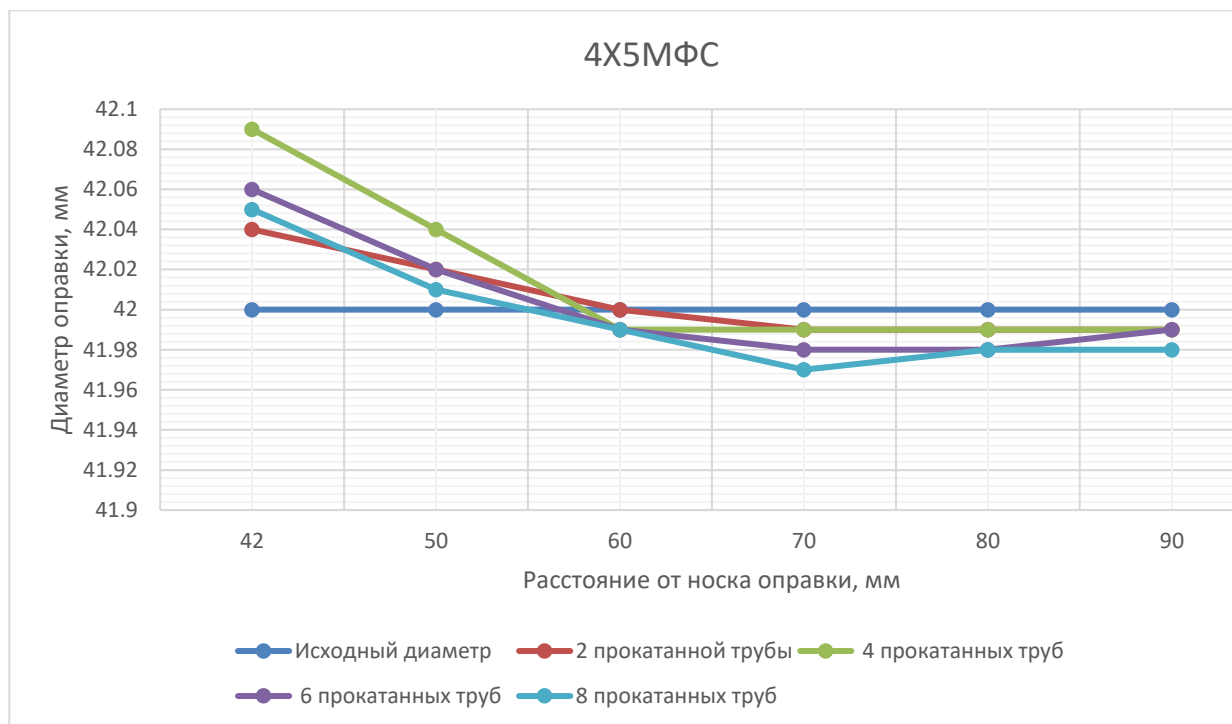
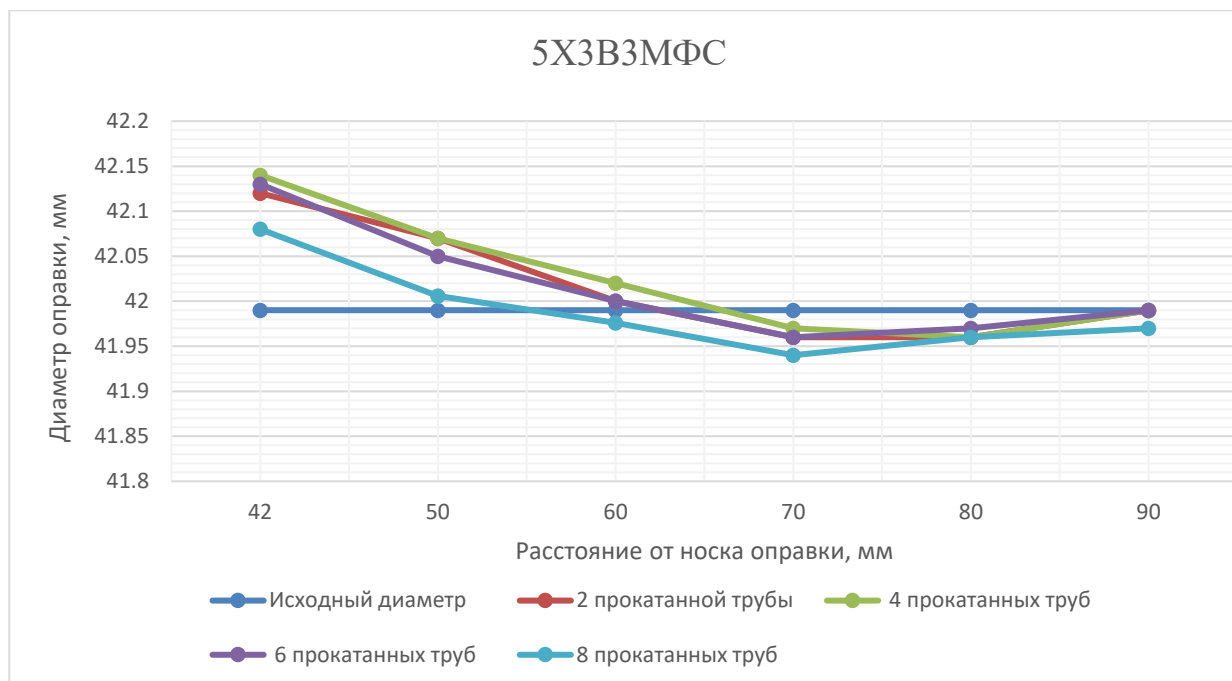
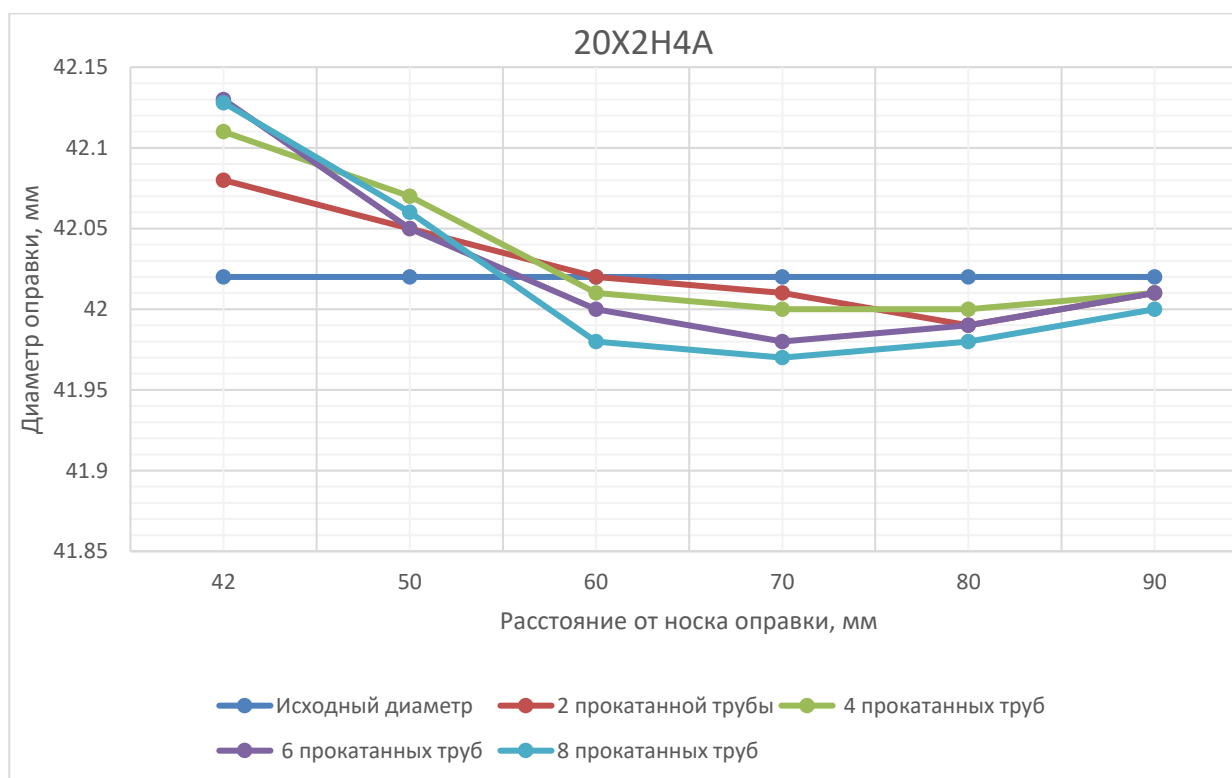


Рисунок 4.12 – Изменения диаметральных параметров оправок из стали марок: а) 4X5MΦC; б) 3X3MΦC после раскатки гильз из стали 20X13



а)



б)

Рисунок 4.13 – Изменения диаметральных параметров оправок из стали марок: а) 5X3B3MΦC; б) 20X2H4A после раскатки гильз из стали 20X13

Из графиков видно, что диаметральные параметры рабочей части оправок уменьшаются пропорционально количеству проведенных раскаток

труб. Исходя из полученных результатов определен уровень износа по длине оправки в зависимости от количества прокатанных труб. На рисунке 4.14.а показано, что на поверхности оправки из стали марок 4Х5МФС после раскатки 6 труб оправка подвергалась незначительному износу. После 8 прокатанных труб зафиксировали максимальное уменьшение диаметра оправки на 0,03 мм в зоне, соответствующей пережиму очага деформации.

Характер износа оправки из стали 3Х3М3ФС представлен в виде графика изменения наружного диаметра по длине её рабочей части (рисунок 4.14 - б). Оправка из данного материала подвергалась интенсивному износу начиная с первых раскатанных труб. Диаметр оправки на рабочей части после 8 прокатанных труб уменьшился на 0,02–0,04 мм.

Аналогичный износ получен на рабочей поверхности оправки, изготовленной из стали 5Х3В3МФС. Необходимо отметить, что после проведения раскатки все 8 труб износ достиг 0,02 ... 0,05 мм (рисунок 4.15 - а).

В отличие от других оправок, изготовленных из выше указанных марок, стали, оправка из стали 20Х2Н4А подвергнута наибольшему износу рабочей поверхности. После раскатки 8 труб на рабочей поверхности оправки глубина износа составила 0,04–0,05 мм.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что с точки зрения состояния наружной поверхности наиболее приемлемым материалом из исследованных в ходе эксперимента является сталь 4Х5МФС.

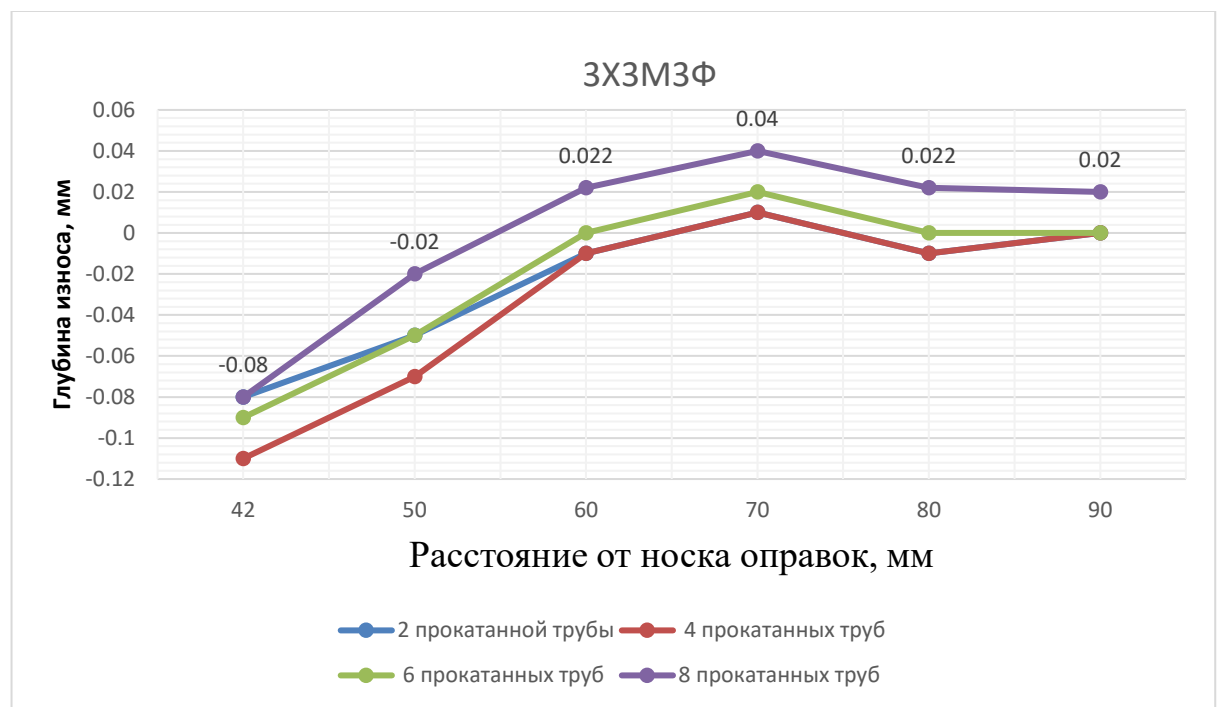
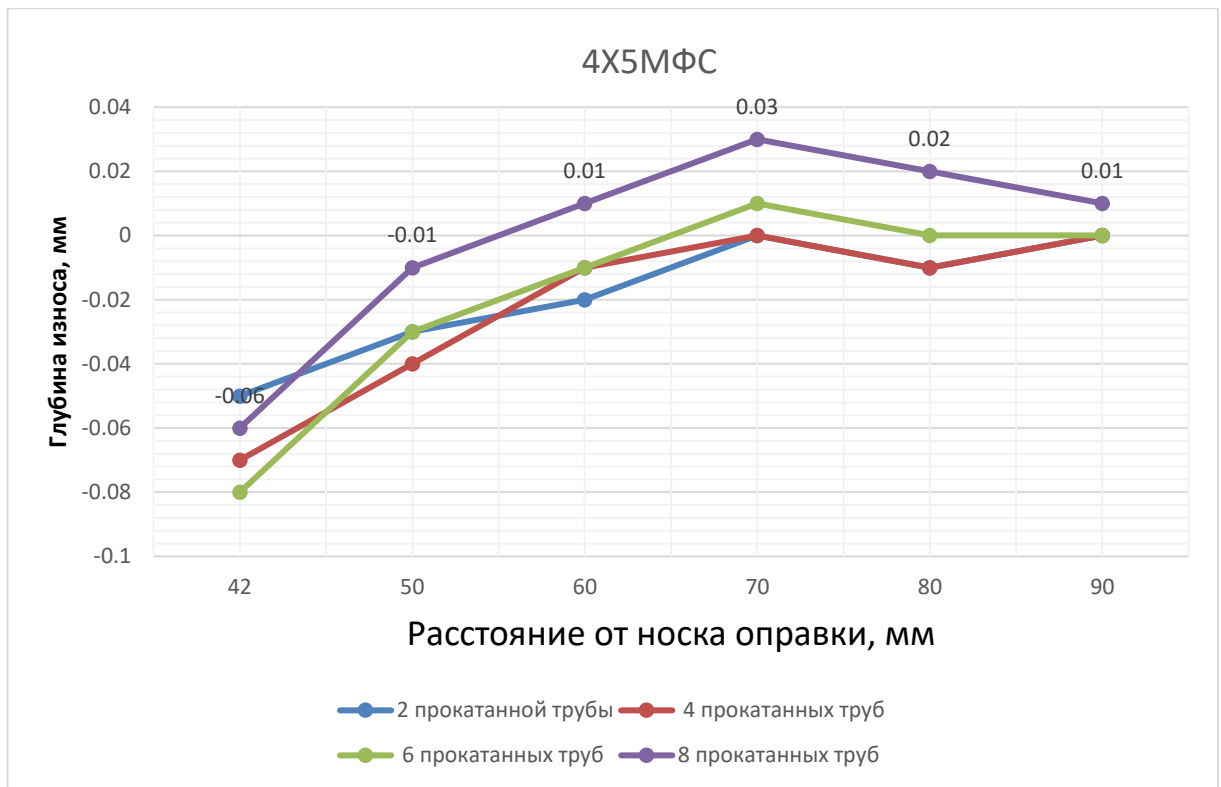
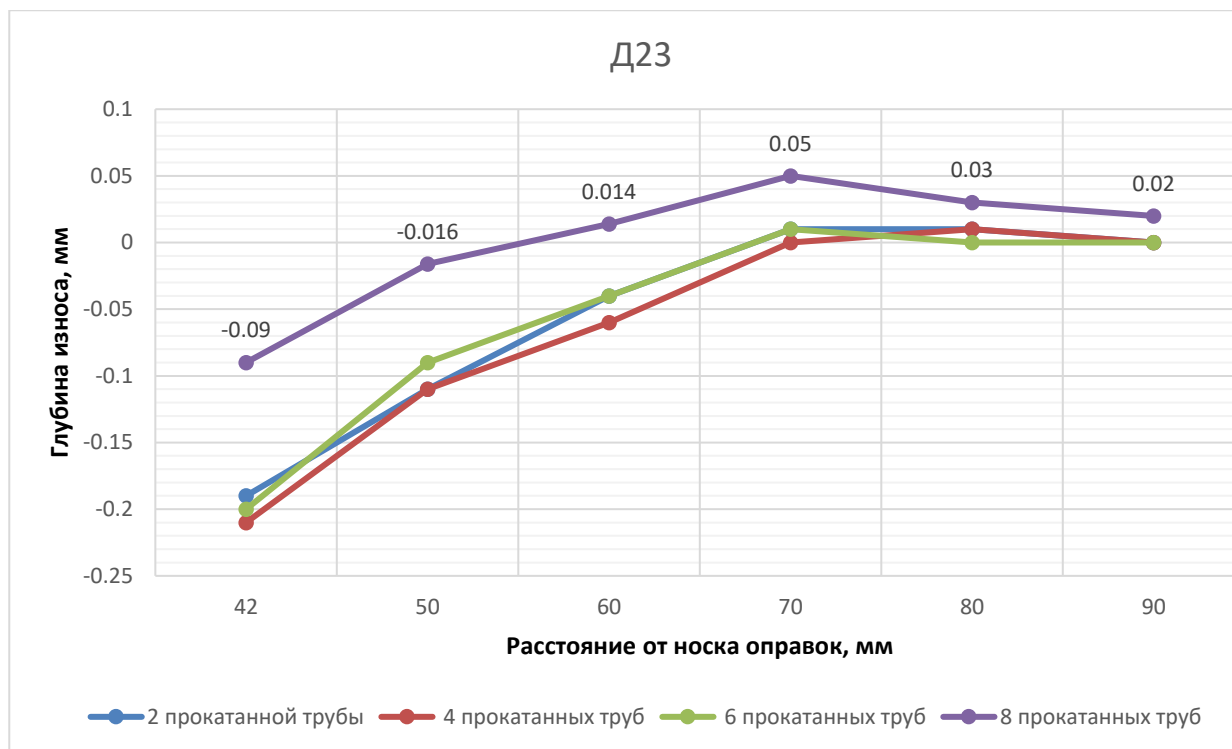
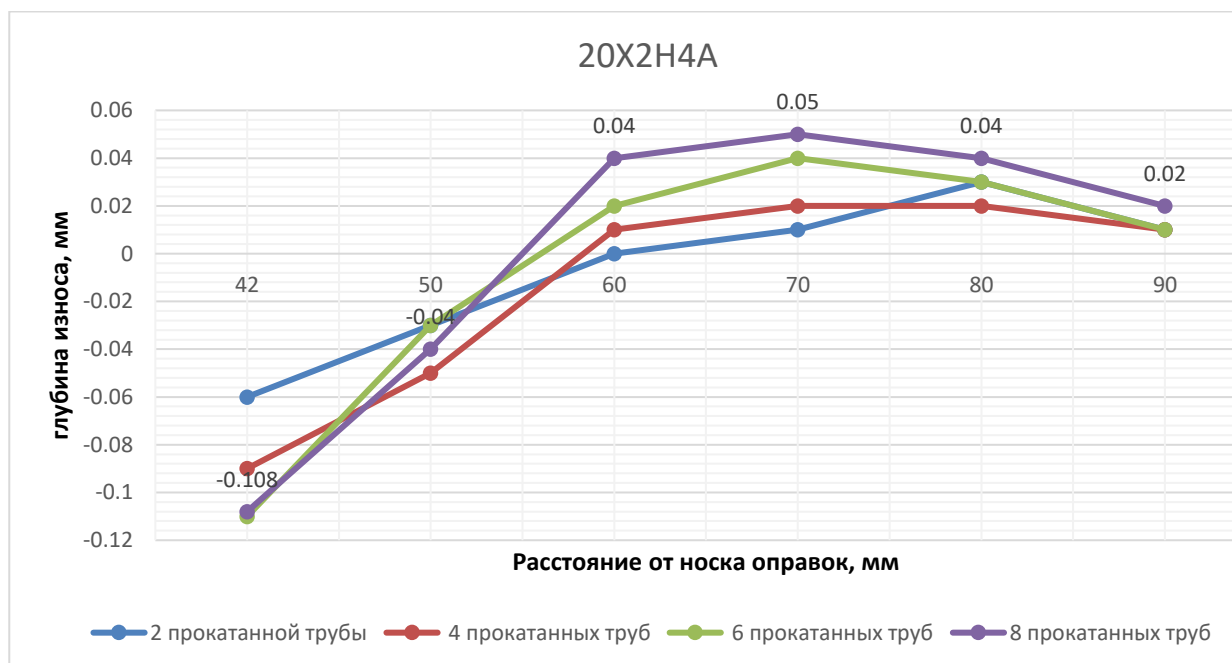


Рисунок 4.14 – Изменение диаметра оправок из сталей а) 4X5MΦC; б)
3X3MΦC после раскатки гильз из стали 20X13



а)



б)

Рисунок 4.15 – Изменение диаметра оправок из марок сталей а) 5Х3В3МФС;
б) 20Х2Н4А после раскатки гильз из стали 20Х13

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены изменения массы исследованных оправок до и после прокатки 8 труб размерам $D \times S = 55 \times 6$ мм, длиной 630 мм

из стали 20Х13 в зависимости углеродного эквивалента материала оправок. Установлено, что потеря металла оправок уменьшается с увеличением углеродного эквивалента. Наименьшая потеря массы также была зафиксирована на оправке из стали 4Х5МФС и составила 1 грамм. В то время как оправка из стали 20Х2Н4А потеряла 3 грамма своей массы. Масса изношенного металла на оправках, изготовленных из сталей 3Х3М3Ф и 5Х3В3МФС составила 2 грамма после раскатки на них 8 труб.

Таким образом, основным критерием для выбора материала оправки следует считать значение потери массы, которое коррелируется с величиной углеродного эквивалента и материалостойкостью.

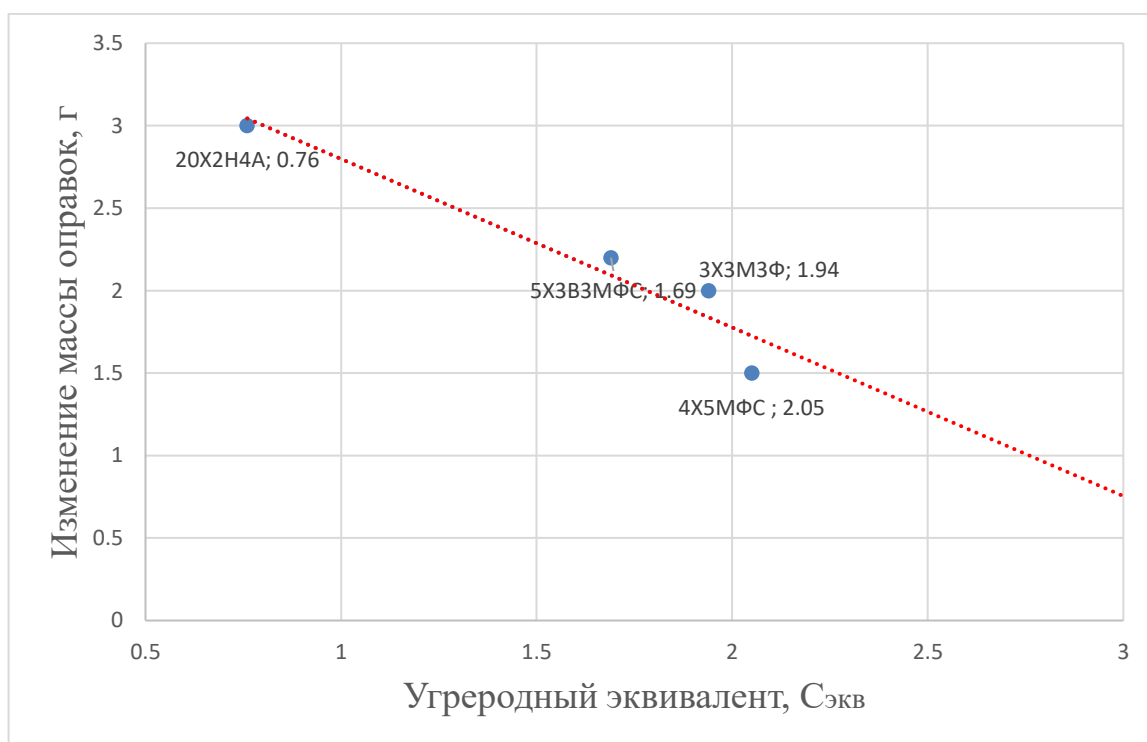


Рисунок 4.16 - Изменение массы оправок в зависимости от величины углеродного эквивалента оправок после 8 раскаток.

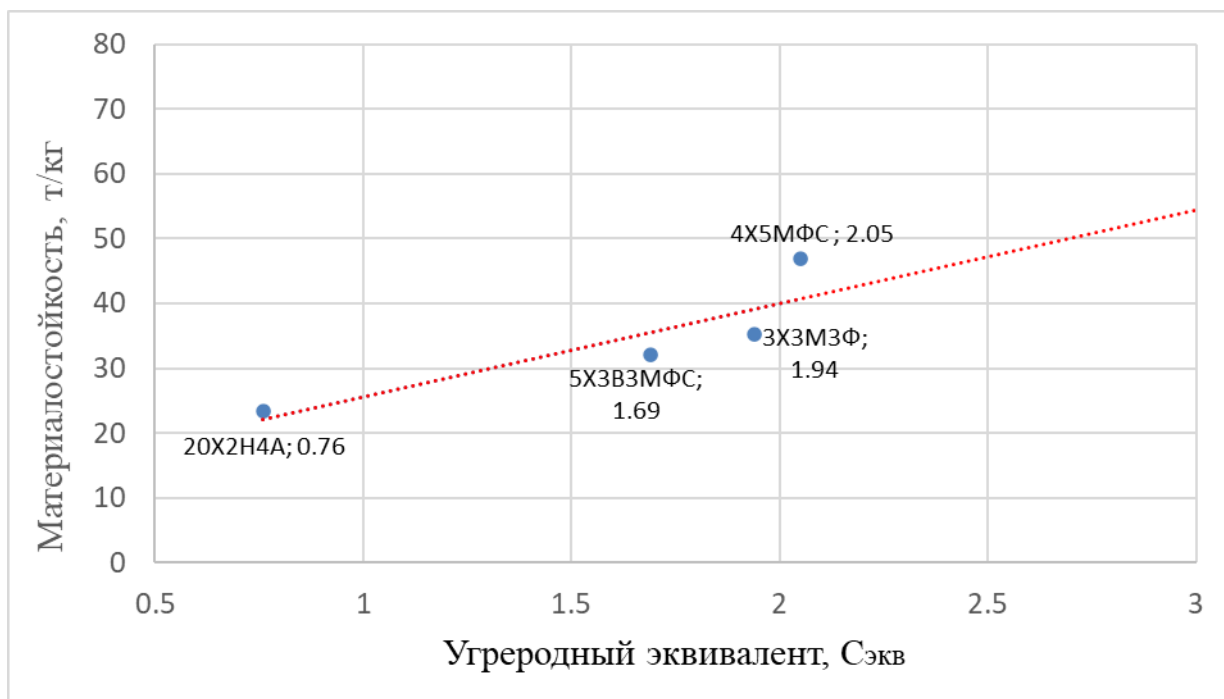


Рисунок 4.17 - Материалостойкость после 8 прокатанных труб в зависимости от величины углеродного эквивалента материала оправок

На рисунке 4.17 показано, что значения материалостойкости оправок возрастает с ростом величины углеродного эквивалента. При углеродном эквиваленте $C_{\text{эк}} = 0,76$ материалостойкость оправки из стали 20X2H4A составила примерно 23 т/кг после 8 прокатанных труб, а для оправок из сталей 5X3B3MΦC и 3X3M3Φ их материалостойкость составила приблизительно от 32 до 35 т/кг ($C_{\text{эк}} = 1,69$ и $C_{\text{эк}} = 1,94$).

4.3 Определение изменения массы оправок

Объем металла Q , удаляемый за время t с контактной поверхности оправки вследствие образования и последующего разрушения адгезионных металлических связей (АМС) с прокатываемым металлом [122], определяется следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial l \cdot \partial t} = v_1 \cdot \delta_1 \cdot P_a \cdot P_c \cdot P_p, \quad (4.2)$$

где dI – размер элементарной площадки контакта в направлении, перпендикулярном скорости относительного скольжения обрабатываемого металла по оправке V_i ; δ_1 – толщина зоны разрушения адгезионной металлической связи на поверхности оправки; P_a – вероятность АМС на площадке контакта; P_c – вероятность смещения зоны разрушения АМС в инструмент; P_p – вероятность увеличения толщины зоны разрушения АМС на поверхности оправки до величины δ_1 .

В первом приближении объем металла оправки Q , удаляемый в ходе адгезионного износа за время прокатки N труб, определяется как

$$Q = \int_0^{Nt_1} \int_0^L V_1 \cdot \delta_1 \cdot P_a \cdot P_c \cdot P_p \cdot dl \cdot dt, \quad (4.3)$$

где t – среднее время скользящего контакта оправки с обрабатываемым металлом при прокатке одной трубы; L – размер площадки контакта оправки с металлом в направлении, перпендикулярном направлению скольжения.

Используя при интегрировании теорему о среднем значении интеграла, получим

$$Q = N \cdot B \cdot L \cdot (\delta_1)_c \cdot (P_a)_c \cdot (P_c)_c \cdot (P_p)_c, \quad (4.4)$$

где B – средний путь скольжения прокатываемого материала по оправке при раскатке одной трубы; $(\delta_1)_c$ – среднее значение толщины зоны разрушения АМС в инструменте; $(P_a)_c$, $(P_c)_c$, $(P_p)_c$ – средние значения вероятностей P_a , P_c , P_p при изготовлении партии из N труб. Средняя толщина слоя, в котором происходит разрушение АМС и вынос продуктов разрушения $\delta \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ м, что соответствует среднему расстоянию между линиями скольжения.

Путь скольжения металла относительно вращающейся оправки при раскатке одной гильзы L_c равный

$$L_c = 2U \cdot (l_T + S_{cp} \cdot n), \quad (4.5)$$

где U – число оборотов оправки при раскатке трубы длиной l_T ; S_{cp} – величина шага винтовой линии; n – количество шагов винтовой линии на длине трубы.

Число оборотов оправки определяется отношением общего контактного времени оправки с прокатываемым металлом к времени, за которое оправка совершает один оборот вокруг оси прокатки. Для определения частоты вращения оправки была применена камера высокоскоростной съемки (1000 кадров/сек) во время раскатки гильзы в трубу на стане МИСиС 130Д при частоте вращения валков равной 27 об/мин (рисунок 4.18). По методике, предложенной Л. Г. Степанским, объем материала инструмента, удаляемый с площадки контакта после прокатки N труб равен:

$$Q = N \cdot B \cdot L_c \cdot \delta \cdot \frac{\sigma_{s2}^2}{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2}, \quad (4.6)$$

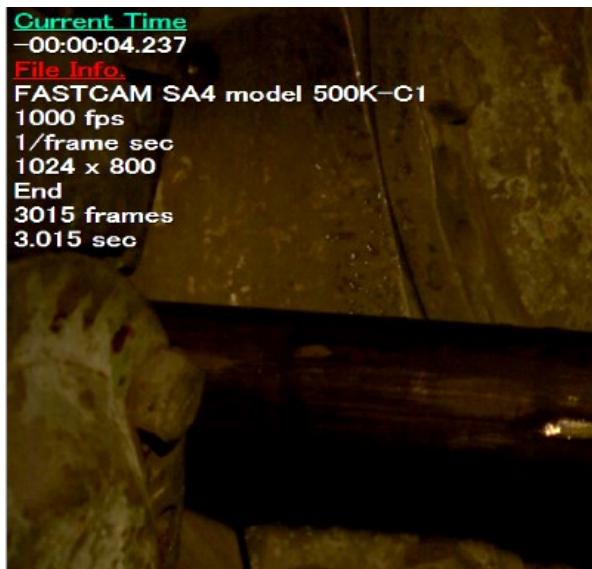
где σ_{s1} – предел текучести напряжения материала инструмента в контактном слое; σ_{s2} – предел текучести напряжения обрабатываемого материала в температурно-скоростных условиях деформирования.

Учитывая температурно-скоростные условия (температура на контактных поверхностях оправок 600 °С до 700 °С и прокатываемого металла 1200 °С, скорость деформации 5 с⁻¹) данные параметра находятся по справочной литературе [123].

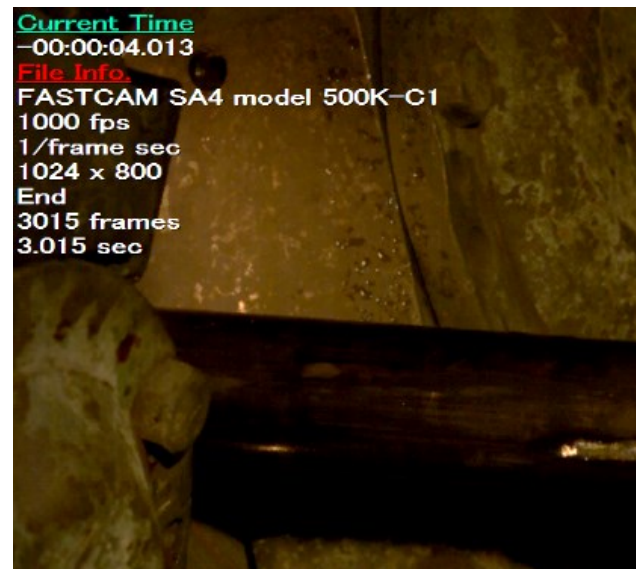
При раскатке труб из стали 20Х13 приближенно объем износа исключая наличие налипания прокатываемого металла на поверхности оправки возможно определить по следующему выражению:

$$V_{и} = K_{и} \cdot \pi \cdot D_{опр} \cdot B \cdot h_{и} \quad (4.7)$$

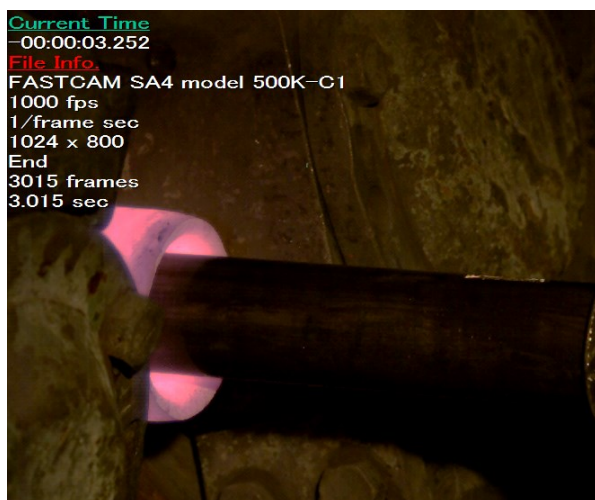
где $K_{и}$ – коэффициент, определяющий отношение длины участка, в котором отсутствует налипание металла на поверхности к среднему пути скольжения прокатываемого материала по оправке при раскатке одной трубы (В); $h_{и}$ – максимальная глубина износа за счет потери металла оправки; $D_{опр}$ – диаметр оправки.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.18 – Фотофиксации стержня: а, б) при заполнении очага металлом; и в, г) в установившемся процессе для определения частоты вращения оправки

Таблица 4.2 – Расчётные данные объема износа оправок

Параметры	-	4X5МФС	3X3М3Ф	5X3В3М ФС	20X2Н4А	4X5МФС
Диаметр оправки, м	$D_{\text{опр}}$	0.042	0.042	0.042	0.042	0.05
Число оборотов оправки	U	33.3	33.3	33.3	33.3	50
Количество прокатанных труб, шт	N	8	8	8	8	5
Средний путь скольжение металла по оправке, м	B	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Длина полученных труб, м	l_T	0.63	0.63	0.63	0.63	1.1
Шаг винтовой линии, м	$S_{\text{ш}}$	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
Количество шагов винтовой линии	$n_{\text{ш}}$	30.0	30.0	30.0	30.0	52.4
Предел текучести напряжения металла оправки, МПа	σ_{s1}	950	800	600	320	950
Предел текучести напряжения материала заготовки, МПа	σ_{s2}	80	80	80	80	80
Время прокатки, с	$t_{\text{пр}}$	8	8	8	8	12
Коэффициент налипания	K_n	0.85	0.75	0.72	0.70	0.85
Средняя толщина слоя, м	δ	2.50E-08	2.50E-08	2.50E-08	2.50E-08	2.50E-08
Глубина износа на оправке, мм	$h_{\text{и}}$	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03
Общий путь скольжения металла, м	L_c	84	84	84	84	220
Объем удаляемого металла по формуле 4.6, мм ³	Q	8.28	11.64	20.54	69.18	13.55
Объем удаляемого металла по формуле 4.7, мм ³	$V_{\text{и}}$	235.24	276.68	331.94	322.72	280.08

Для оценки корректности полученных расчетов вышеперечисленными методами определили массу удаляемого металла исходя указанных в таблице 4.3 величин их объема.

Таблице 4.3 – Данные о потере металла оправок после раскатки гильз из стали 20Х13

Марка стали	4Х5МФС	3Х3М3Ф	5Х3В3МФС	20Х2Н4А	4Х5МФС
Плотность материала оправок ρ , кг/м ³	7550	7600	7800	7850	7550
Количество прокатанных труб	8	8	8	8	5
Диаметр оправки $D_{\text{опр}}$, м	0.042	0.042	0.042	0.042	0.05
Размеры гильз $D_{\text{г}} \times S_{\text{г}}$, мм	62x7.5	62x7.5	62x7.5	62x7.5	72x9
Размеры труб $D_{\text{т}} \times S_{\text{т}}$, мм	55x6	55x6	55x6	55x6	62x6
Длина труб $l_{\text{т}}$, мм	630	630	630	630	1100
Масса потери металла оправок $Q \cdot \rho$, г	0.04	0.1	0.1	0.3	0.1
Масса потери металла оправок $V_{\text{и}} \cdot \rho$, г	1.8	2.1	2.5	2.4	2.1
Реальные изменения массы оправок, г	1	2	2	3	2

Результаты расчета показали, что применять методику, предложенную Л. Г. Степанским на основе образования и последующего разрушения адгезионных металлических связи для расчета изношенных металла оправок при прокатке труб из коррозионностойких сталей нецелесообразно. Разработанная методика расчета удаляемой массы металла с учета налипания металла на оправку позволяет с высокой точностью определить время вывода из строя работы оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование износа оправок при раскатке гильз из коррозионностойкой стали марки 20Х13 на опытно-промышленном стане МИСиС 130Д с применением короткой цилиндрической оправки диаметром 50 мм, удерживаемой стержнем, работающим на сжатие. В ходе выполнения исследования определили материалостойкость оправки после прокатки партии по 5 труб на основе зафиксированных весовых параметров труб и оправки до и после прокатки. Установлено, что, на рабочей поверхности оправки материалостойкость при раскатке 57 кг труб из стали 20Х13 составила 28,5 т/кг, масса раскатной оправки уменьшилась соответственно на 0,002 кг (без учета массы налипшего металла). Максимальный износ диаметра оправки составил до 0,05 мм.

Исследован процесс раскатки труб из стали 20Х13 на разных оправках, изготовленных из разных сталей с целью, выбора подходящего материала, который обладает низкой склонностью к схватыванию с деформируемым металлом, и способен повысить рабочий ресурс инструмента. В ходе эксперимента проведена раскатка труб на оправках, изготовленных из сталей: 4Х5МФС, 3Х3М3Ф, 5Х3В3МФС, 20Х2Н4А. Установлено, что с точки зрения состояния наружной поверхности наиболее приемлемым материалом из исследованных является сталь 4Х5МФС. При этом оправка из стали 20Х2Н4А с нанесенным покрытием методом ХГН позволять повысить её износостойкость.

Установлено, что повышение углеродного эквивалента материала оправки оказывает положительное влияние на материалостойкость. Разработана методика расчета массы удаляемого металла, с учетом налипания на рабочую поверхность позволяющая с высокой точностью определить время вывода из строя работы оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей.

Заключение

1. Выполнено моделирование процесса раскатки труб методом конечных элементов с использованием программного комплекса Qform, выявлены основные технологические факторы процесса раскатки, оказывающие влияние на износостойкость коротких оправок, состояние поверхности и точность получаемых труб: угол подачи, коэффициент вытяжки, коэффициент овализации. На основе моделирования получена закономерность распределения прогнозируемого износа рабочей поверхности оправки по длине её рабочей поверхности. Установлено, что износостойкость оправки снижается с увеличением коэффициента вытяжки с 1,52 до 1,84. Уменьшение угла подачи и коэффициента овализации в пределах заданных параметров приводит к снижению износостойкости оправок;

2. Определены рациональные режимы прокатки для получения точных труб с наименьшим износом оправки и высоким качеством внутренней поверхности: углы подачи рабочих валков $\beta = 12...14^\circ$, коэффициенты вытяжки и овализации $\mu = 1,52...1,6$ и $\zeta = 1,11...1,13$ соответственно;

3. Проведена экспериментальная раскатка труб из коррозионностойкой стали 20Х13 на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д. Оценка точности полученных труб их стали 20Х13 показала, что их разностенность находится в пределах 1,8...3,5%. Установлено, что высокая разностенность исходных гильз может являться причиной, вызывающей увеличение разностенности получаемых труб. Отмечено, что при отклонении толщины стенки гильз до 4,5% разностенность труб после раскатки по приведенному режиму изменяется в пределах 1,8...3%, при этом разностенность труб увеличивается до 3,5% при разностенности исходных гильз больше 5%;

4. Осуществлена раскатка труб на термообработанных оправках, изготовленных из марок сталей: 4Х5МФС, 3Х3МЗФ, 5Х3ВЗМФС, 20Х2Н4А. Установлено, что с точки зрения состояния качества внутренней поверхности труб наиболее приемлемым материалом из исследованных является сталь

4X5МФС. Исследовано влияние состояния рабочей поверхности оправок на качество внутренней поверхности раскатанных на них труб из коррозионностойких сталей. Применение износостойких оправок из стали 4X5МФС с высоким качеством рабочей поверхности позволяет получить трубы с шероховатостью внутренней поверхности в пределах $Ra = 3,2 \dots 3,5$ мкм;

5. Установлено, что с увеличением углеродного эквивалента материала, из которого изготавливаются оправки, повышается материалостойкость инструмента. Отмечено, что покрытие, нанесенное методом холодного газодинамического напыления на оправку из стали 20X2Н4А позволяет сохранить исходное состояние поверхности оправки дольше по сравнению с термообработанной оправкой;

6. Разработана методика расчета изношенной массы металла с учета налипания металла на оправку, позволяющая с высокой точностью прогнозировать время вывода из эксплуатации оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей.

Список использованных источников

1. Данилов, Ф. А., Глейберг, А. З., Балакин, В. Г. (1972). Горячая прокатка и прессование труб. М.: Metallurgy, 591, 17.
2. Тетерин П. К. Теория поперечной и винтовой прокатки. — М.: Metallurgy, 1983. 272-С.
3. Романцев, Б. А и др. Трубное производство. 2011. М.: Дом МИСиС. 969-С.
4. Патент: SU 818681 A1. Потапов И. Н. и др. Способ винтовой раскатки труб. 1981.
5. Емельяненко, П. Т. (1949). Теория кривой и пилигримовой прокатки. М.: Metallurgizdat.
6. Потапов, И. Н., & Полухин, П. И. (1990). Технология винтовой прокатки. М.: Metallurgy, 344, 2.
7. Глейберг А.З. и др. Труды ВНИИМЕТМАШ. № 37.-С. 57–62.
8. Целиков, Н. А., Котенок, В. И., Выгоднер Б. Ф., Петров С. И., Подобедов С. И. Технологический инструмент стана винтовой прокатки. Патент. SU 1666237 A1. 1991.
9. Патент: RU 2635207 C1. Романцев, Б. А., Гончарук, А. В., Алещенко, А.-С., Корзун, Н. Б., Орлов, Д. А., & Степанов, П. П. Способ изготовления бесшовных труб диаметром менее 120 мм винтовой прокаткой. 2017
10. Патент: SU 358041 A1. Ващенко Ю. И. и др. Способ винтовой прокатки труб на трехвалковом стане. 1972.
11. Патент: SU 623594 A1. Потапов И. Н. и др. Способ винтовой прокатки труб. 1978.
12. Андреев Е. А., Остренко В. Я, Лисицын А. И. Производство бесшовных труб // Metallurgy. 1973. № 2.-С. 17–23.

13. Чекмарев А. П., Ваткин Я. Л., Ханин, М. И., Биба В. И., Кирвалидзе Н.-С. Прошивка в косовалковых станах. М: Metallurgy, 1967. 240-С.
14. Барабашкин В. П., Тартаковский И. К. Производство труб на агрегатах с трехвалковым раскатным станом. М.: Metallurgy, 1981. 148-С.
15. Матвеев, Ю. М., Ваткин, Я. Л. Калибровка инструмента трубных станов. М.: Metallurgy, 1970. 480-С.
16. Грюнер П. Калибровка инструмента для производства бесшовных труб. Москва: Metallurgizdat, 1968. 176-С.
17. Патент: SU 818681 A1 USA. Потапов И. Н. и др. Способ винтовой раскатки труб. 1981.
18. Корсаков А.А. Совершенствование технологии винтовой прокатки непрерывнолитой заготовки с целью уменьшения диаметра черновой трубы: дис. - Южно-Уральский государственный университет, 2015.
19. Романцев Б.А. и др. Мини-трубопрокатный агрегат 40-80 с трехвалковым раскатным станом винтовой прокатки // Metallurg. 2011. № 12.-С. 69–73.
20. Патент. RU 2416474 C1. Минтаханов М. А., Зарудный В.-С., Романцев Б. А., Гончарук А. В., Бедняков В. В. Способ винтовой прокатки труб и стан для его осуществления. 2011.
21. Романцев Б. А и др. Получение горячекатаных труб из стали X18H10T на станах винтовой прокатки // Производство проката. 2014. № 8.-С. 14–17.
22. Романцев Б.А. и др. Получение полых толстостенных профилей и труб из титановых сплавов методом винтовой прокатки // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 4.-С. 38–41.
23. Зимин В. Я. и др. Опыт прокатки труб на калибровочном стане винтовой прокатки ТПА 70-270 ОАО" Выксунский металлургический завод" и совершенствование калибровки рабочих валков // Производство проката. 2011. № 2.-С. 11–14.

24. Алещенко А.-С. Исследование и разработка методики проектирования технологического инструмента станов винтовой прокатки гильз и труб: дис. – Национальный исследовательский технологический университет" МИСиС". 2010.
25. Патент. RU 2315671 C1 USA, Россия. Галкин С. П., Гончарук А. В. Р.Б.А. Способ винтовой прокатки труб: 2008.
26. Романцев Б. А., Гончарук А. В., Алещенко А.-С. Трубопрокатный агрегат с трехвалковым раскатным станом винтовой прокатки—мини ТПА 40-80. Инновационные технологии в металлургии и машиностроении.— Екатеринбург, 2012.
27. Патент. SU 727286 A1. ГЛЕЙБЕРГ А.З. и др. Способ производства труб. 1980.
28. Выдрин А. В. Развитие технологий горячей прокатки бесшовных труб // Черные металлы. 2012. № 9.-С. 16–20.
29. Романцев Б. А., Гончарук А. В., Михайлов В. К Б.Е.С. Анализ и пути совершенствования процессов горячей раскатки труб // Сталь. 2002. № 12.-С. 44–47.
30. Матвеев Б. Н., Голубчик Р.М. Новые исследования процесса прошивки заготовок в косовалковых станах // Сталь. 2000. № 9.-С. 53–58.
31. Звонарев Д. Ю., Нерозников В. Л., Трубников К. В. Анализ влияния профиля направляющего инструмента прошивного стана на разнотолщинность получаемых гильз // Трубы. 2018.-С. 102–105.
32. Остренко Я.В. Исследование разностенности гильз при кривой прокатке // Сталь. 1970. № 8.-С. 728–732.
33. Будников А. С., Харитонов Е. А., Сорокин Ф. В. Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трехвалковом стане винтовой прокатки // Сталь. 2017. № 10.-С. 31–34.
34. Гончарук А.В. и др. Влияние режимов деформации на точность бесшовных труб // Технология металлов. 2020. № 1.-С. 50–54.

35. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. Металлургия. 1975. 240 с.
36. Будников А.-С. Совершенствование процессов раскатки и калибрования труб в трехвалковых станах винтовой прокатки. : дис. – Национальный исследовательский технологический университет" МИСиС". 2020.
37. Krivchenko Yu.S. et al. Reduced metal consumption in hot pipe rolling // *Steel in Translation* 2010 40:4. Springer, 2010. Vol. 40, No 4. P. 363–369.
38. Aleshchenko A.S., Budnikov A.S., Kharitonov E.A. Metal Forming Study during Pipe Reduction on Three-High Rolling Mills // *Steel in Translation* 2019 49:10. Springer, 2020. Vol. 49, № 10. P. 661–666.
39. Romantsev B.A. et al. Mini tube-production unit 40-80 with a three-high reeling mill // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55, No 11–12. P. 918–924.
40. Король А. В. И др. Анализ стойкости оправок на прошивном стане Дишера // *Сталь*. 2011. № 2.-С. 59–61.
41. Герасимов, Ю. Л. К вопросу рациональной формы оправок для прошивки заготовок в косовальковом стане Дишера//Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления. 2017.-С. 168-172.
42. Mul'chin V. v. et al. Determining the adjustment of piercing mills with driven guide disks (Disher mills) // *Steel in Translation* 2010 40:8. Springer, 2010. Vol. 40, No 8. P. 766–768.
43. Goncharuk A. V. et al. Piercing of a Billet in a Mill with Guide Disks // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020, No 13. P. 1637–1642.
44. Orlov, D. A., Gamin, Y. V., Goncharuk, A. V., & Romantscev, B. A. Development and Investigation of Piercing Process Using Cooled Guide Shoes. *Metallurgist*. 2021. 65(3), 389-399.
45. RU 2476279 C2 USA. Латкин Д.И. и др. Направляющий инструмент стана винтовой прокатки: pat. 2013.

46. Orlov, D. A. et al. Analysis of pipe piercing on PRP 70–270 with FEM modeling. *Izv. Vysshikh Uchebnykh Zaved. Chernaya Metall*, 2020, 63: 848–855.
47. Пат. RU2735436C1 USA. Орлов Д.А. и др. Способ винтовой прокатки в гильзу: 2020.
48. Пат. RU 2 309 809 C1 USA. Марченко Л.Г. и др. Способ винтовой прокатки заготовки. 2007.
49. Romantsev B.A. New technology for pipe rolling on mini mills // *Steel in Translation* 2011 41:12. Springer, 2012. Vol. 41, No 12. P. 1019–1024.
50. Romantsev B.A. et al. Introducing seamless-pipe production at OAO vyksunskii metallurgicheskii zavod // *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, No 9. P. 803–805.
51. Romantsev B.A. et al. Development of seamless pipe production in JSC “Vyksunskii metallurgicheskii zavod” // *Prod Rolled*. 2009. Vol. 6. P. 32–34.
52. Romantsev B.A. et al. Improving the Regimes Used for Hot-Rolling Tubes on Mini Tube-Production Unit 70–270 // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59, No 5–6. P. 386–389.
53. Орлов Д.А., Гончарук А.В., Кобелев О.А., Комарницкая О.Г. Б.Н.С. Анализ особенностей процесса прошивки труб на ТПА 70-270 с применением метода конечных элементов // *Черная металлургия*. 2020. Vol. 10, № Том 63.-С. 848–855.
54. Romantsev B. et al. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes’ production // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, No 9–12. P. 3223–3230.
55. Орлов Д. А. Совершенствование технологии двойной прошивки заготовок на станах винтовой прокатки. дис. – Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС". 2021.
56. Epler M.E., Misiolek W.Z. Novel billet design for co-extrusion of ferrous material tubes // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 429, No 1–2. P. 43–49.

57. Богатов, А. А., Павлов, Д. А., Нухов, Д. Ш. (2017). Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учебное пособие.
58. Serin K., Pehle H.J. Improved service life of hot working tools in seamless tube plants | Verbesserte Standzeit von Warmumformwerkzeugen in Nahtlosrohrwerken // Stahl und Eisen. 2014. Vol. 134, No 11. P. 161–174.
59. Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка. МИСиС, 2000. 128 с.
60. Сазоненко, И. О., Земцов В. А., Юрчак А. Н. К вопросу повышения стойкости оправок прошивных станов. Литьё и металлургия. 2012. 4 (68). С. 135-138.
61. Барыкин И.П. и др. Температурный режим и напряженное состояние оправок прошивных станов // Труды УАИ. 1973. № 47.-С. 118–122.
62. Сычева, С. С., Петрова, В. Ф., Кустова, А. Н., Дубцов, Ю. Н. Исследование причин разрушения прошивных оправок из стали 20Х2Н4МФ. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. №5.-С. 122-124.
63. Кутепов В. А. Практика использования оправок прошивного стана с внутренним водяным охлаждением // 7-я международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Издательство Уральского университета, 2014. Р. 427–435.
64. Сенякина А. С., Макарова О. А. Анализ влияния неметаллических включений на стойкость оправок прошивного стана // Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ» академик РАН ИА Новаков. 2013.-С. 58.
65. Касьян В. Х., Мазур С. В. Влияние температурно-силовых условий деформации на стойкость прошивных оправок // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 2.-С. 57–61.

66. Коновалов, М.С., Шеногин, В. П. Исследование стойкости прошивных оправок малого диаметра из сплава на основе Ni3Al // Молодые ученые-ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. 2016.-С. 44-50.
67. Коновалов М. С. О выборе материала, конструкции и способа изготовления оправок для прошивки заготовок из коррозионностойких сталей // Инновационная наука. 2015. № 12–2.-С.70-73.
68. Романцев Б.А. и др. Особенности износа оправок прошивного стана ТПА 159-426 при прошивке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 4.-С. 22–31.
69. Чубуков М.Ю., и др. Оценка влияния длительности эксплуатации оправок прошивного стана на фазовый состав и структуру поверхностного оксидного слоя // Сталь. 2016. № 11.-С. 41–45.
70. Ohnuki A. et al. Surface Behavior and Temperature of Plug in Piercing of Seamless Steel Pipe. // Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 1986. Vol. 72, No 3. P. 450–457.
71. Konovalov M.S., Shenogin V.P. Increase of the Durability of the Ni3Al-based alloy Piercing Plug on Account of Reinforcing Particles // Intellekt. Sist. Proizv. 2017. Vol. 15, No 3. P. 18.
72. Венгура А.В. и др. Увеличение эксплуатационной стойкости технологического инструмента прошивного стана трубопрокатного цеха. Белорусский национальный технический университет, 2013. № 4 (73).-С. 94–98.
73. Фартушный Н. И, Романцев Б. А., Кузнецов Е. В. Повышение стойкости инструмента прошивного стана // Производство проката. 2007. № 6.-С. 22–25.
74. Коликов А.П. и др. Исследование стойкости технологического инструмента при высокотемпературной винтовой прокатке // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1976. № 5.-С. 125–128.

75. Бодров Д. В. Исследование теплового состояния водоохлаждаемых оправок для увеличения их износостойкости при прошивке заготовок из легированных сталей. дис. – Национальный исследовательский технологический университет" МИСиС". 2012.

76. Сенякина А. С., Макарова О. А. Исследование микротвердости оправки прошивного стана и ее влияние на износостойкость // ИЗВЕСТИЯ ВолгГТУ. 2013. 20 (123).-С. 60–62.

77. Dotsenko G.E. et al. Uvelichenie stoikosti opravok proshivnogo stana putem sovershenstvovaniia tekhnologii naplavki i termicheskoi obrabotki // Relevant lines of scientific research: theory and practice. TSNS Interaktiv Plus, 2020. P. 121–124.

78. Вавилкин Н.М., Бодров Д.В. Исследование теплового и термонапряженного состояний водоохлаждаемых оправок различных конструкций // Производство проката. 2011. № 3.-С. 12–14.

79. Вавилкин Н.М. et al. Особенности износа водоохлаждаемых оправок при прошивке легированных сталей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2009. № 7.-С. 37–40.

80. Sherkunov V.G., Korsakov A.A. Influence of shape and size of the tip of the piercing mill mandrel on the formation of internal defects in shells and aPlication of continuously cast billets for pipe diameters of less than 121 mm // Bulletin of the South Ural State University. Series ‘Metallurgy.’ 2015. Vol. 15, No 4. P. 116–121.

81. Вавилкин Н.М. et al. Исследование термонапряженного состояния водоохлаждаемых прошивных оправок // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2010. № 9.-С. 35–38.

82. Жанабаева, Г. М., Сержанов, Р. И., & Богомолов, А. В. (2012). Экспериментальное исследование водоохлаждаемых прошивных оправок. Наука и техника Казахстана, №(1-2). -С. 59-63.

83. Хавкин Г. О., Бродский В. М., Лисовая Г. В. Сравнительная характеристика водоохлаждаемых оправок прошивного стана, изготовленных различными способами *Сталь* // *Сталь*. 2004. № 8.-С. 60–62.
84. Жанабаева, Г. М., Сержанов, Р. И., Богомолов, А. В. Стойкость оправок прошивного стана // *Наука и техника Казахстана. Павлодарский государственный университет имени-С. Торайгырова*, 2011. № 3–4.-С. 34–40.
85. Романцев Б.А. и др. Повышение износостойкости оправок прошивного стана // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2008. № 11.-С. 16–20.
86. Шапиро И.А., Хавкин Г. О., Бродский В. М. Повышение эффективности использования оправок прошивных станов // *Сталь*. 2009. № 9.-С. 75–76.
87. Корсаков А. А. и др. Анализ технологических решений, направленных на повышение стойкости оправок прошивных станов // *Производство проката*. 2012. № 5.-С. 27–35.
88. Чучвага А.П. и др. Повышение стойкости оправок стана пресс-валковой прошивки 159-426 // *Сталь*. 2000. № 2.-С. 51–51.
89. Македонов-С. И., Ермакова Р. В., Козлов В. М. Высокотемпературное оксидирование оправок прошивного стана // *Сталь*. 1989. №11.-С. 68–70.
90. Литвиненко-Арьков В.Б., Соколов Г.Н., Лысак В.И. Дуговая наплавка раскатной поверхности прошивных оправок // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2010. № 11. -С. 79–81.
91. Волков Д., Ямников А. Комплексная технология изготовления винтовых прессовых оправок // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2012. № 11–1. -С. 292-298.
92. Соколов Г.Николаевич., Литвиненко-Арьков В.Борисович., Лысак Владимир. Способы повышения ресурса прошивных оправок трубопрокатных станов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 11.-С. 10–14.

93. Литвиненко-Арьков В.Б., Соколов Г.Н., Лысак В.И. К.Ф.А. Расчет режима дуговой наплавки колеблющимся электродом оправок трубопрокатного стана. 2010. -С. 20–24.
94. Выдрин А.В. и др. Экспериментальное исследование влияние формы оправок прошивного стана на их износостойкость // Трубы-2014. 2014.- С. 156–159.
95. Литвиненко-Арьков, Вадим Борисович. Аргонодуговая наплавка порошковой проволокой с наночастицами TiCN поверхности оправок трубопрошивного стана. Дис: - Волгоградский государственный технический университет, 2012.
96. Герасимов Ю. Л., Авдеев-С. В., Бобарикин Ю. Л. Исследование влияния особенностей оксидированного покрытия прошивных оправок на их эксплуатационную стойкость // Черные металлы. 2017. № 7. -С. 46–49.
97. Цурихин, Сергей Николаевич. Разработка технологии электрошлаковой наплавки оправок трубопрошивного стана термостойким сплавом на основе Ni3Al. Дис. -Волгоградский государственный технический университет, 2007.
98. Зорин И.В. et al. Наплавка трубопрошивных оправок сплавом на основе Ni3 Al в никеле с использованием композиционной проволоки // Сварка и диагностика. 2016. № 2. -С. 16–19.
99. Чубуков М.Ю. et al. Исследование влияния технологии изготовления оправок прошивного стана на особенности строения поверхностных и внутренних оксидных слоев // Черные металлы. 2016. № 1. - С. 28–33.
100. Манегин Ю. В, Анисимова И. В. Стеклосмазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов. Metallurgy. М.: Metallurgy, 1978. 223 с.
101. Ведякин Н.М., и др. Прошивка труб на оправках со смазкой // Сталь. 1974. № 2. -С. 156–159.

102. Чубуков М. Ю., Руцкиц Д. В., Зюбан Н. А. Влияние режимов окислительного отжига оправок на морфологию и состав поверхностных слоев оправок прошивного стана, применяемых для производства бесшовных труб // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16. 2016. -С. 343–344.
103. Чубуков М. Ю., Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Палаткина, Л. В., Усков Д. П. Влияние длительности эксплуатации оправок прошивного стана на структуру и состав поверхностных слоев. Черные металлы. 2016. № 11. -С. 26-30.
104. Chubukov M.Yu. et al. Change in the surface oxide layer of piercing-mill mandrels over time // Steel in Translation. 2016. Vol. 46, No 11. P. 818–822.
105. Дубцов Ю.Н. Разработка композиционной проволоки для сварки и наплавки сплавов на основе Ni3Al. Дис: - Волгоградский государственный технический университет, 2013.
106. Доценко Г. Е., Остроброд С. Б., Новоселова Т. В., Толмачёва Л. В. Увеличение стойкости оправок прошивного стана путем совершенствования технологии наплавки и термической обработки. TSNS Interaktiv Plus, 2020. -С. 121–124.
107. Романцев, Б. А., Гончарук, А. В., Алещенко, А. С., Онучин, А. Б., & Гамин, Ю. В. Совершенствование режимов горячей прокатки труб на мини ТПА 70-270 // Металлург. 2015. № 5. -С. 41–43.
108. Pater Z., Kazanecki J. Complex Numerical Analysis of the Tube Forming Process Using Diescher Mill // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58, No 3. P. 717–724.
109. Pater Z., Kazanecki J. Thermo-mechanical analysis of piercing plug loads in the skew rolling process of thick-walled tube shell // Metallurgy and Foundry Engineering. 2006. Vol. 32, No 1. P. 31- 40.
110. Pater Z., Tofil A. Fem Simulation of the Tube Rolling Process in Diescher ' S Mill. 2014. Vol. 8, No 22. P. 51–55.

111. Pater Z., Wójcik Ł., Walczuk P. Comparative Analysis of Tube Piercing Processes in the Two-Roll and Three-Roll Mills // *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2019. Vol. 13, No 1. P. 37–45.
112. Pater Z., Kazanecki J., Bartnicki J. Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 177, No 1–3. P. 167-170.
113. Kazanecki J., Pater Z., Bartnicki J. 3D FEM analysis of basic process parameters in rotary piercing mill // *III European Conference on Computational Mechanics*. Dordrecht: Springer Netherlands. P. 140–140.
114. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts // *Metalurgija*. 2015. Vol. 54, No 4. P. 627–630.
115. Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3D finite elements method (FEM) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill // *Metalurgija*. 2012. Vol. 51, No 4. P. 501–504.
116. Gamin Yu. v. et al. Prediction of Billet Fracture at Two-High Screw Rolling Piercing // *Metallurgist*. 2021. Vol. 64, No 9–10. P. 1020-1028.
117. Aleshchenko A.S. et al. Wear features of working tools during piercing of high-temperature alloys // *Chernye Metally*. 2018. Vol. 8, № 8. P. 63–70.
118. Yoshida, M. 3D FEM simulation of rolling load working on piercer plug in mannesmann piercing process // *AIP Conference Proceedings* // American Institute of Physics. 2010. Vol. 1252, No 1. P. 1333-1338.
119. Malinowski Z., Kazanecki J., Urbański S. Thermal-mechanical model of the tube elongation process in Diescher's mill // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. Vol. 60, No 1–4. P. 513–516.
120. Герасимов Ю.Л., Авдеев С. В. Исследование влияния оксидированного покрытия прошивных оправок на их эксплуатационную стойкость // *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления*, 2016. -С. 125–128.

121. Соколов, Г. Н., Лысак, В. И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей. Издательство: ВолгГТУ "РПК "Политехник". 2005. 284-С.

122. Степанский, Л.Г. Прогнозирование надёжности технологических процессов, инструмента и машин в обработке металлов давлением / Л.Г. Степанский. - М.: Модерат, 2015. 916 с.

123. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов // М. М: Металлургия, 1976. 488 с.