

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

НГУЕН КУАНГ

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

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент

Алещенко Александр Сергеевич

Москва – 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных условиях многие отрасли отечественного машиностроения испытывают потребности в горячекатаных и холоднокатаных трубах из высоколегированных сталей и сплавов. Исследования, проведенные в НИТУ «МИСиС», показали, что для реализации этого сортамента труб наиболее перспективной является технология горячей прошивки и последующей раскатки труб на станах винтовой прокатки. Однако в этой технологии наиболее уязвимой является износостойкость коротких оправок для прошивки и раскатки. Известно, что имеющийся низкий ресурс работоспособности оправок при прокатке бесшовных труб на станах винтовой прокатки приводит к повышенным издержкам, накладывая ограничения на производительность оборудования и снижение качества получаемых труб. Однако, вопросы по износу раскатных оправок и влиянию основных технологических факторов на их износостойкость при прокатке труб ещё недостаточно изучены теоретически и экспериментально. Также отсутствуют обобщенные данные по износостойкости при раскатке гильз из высоколегированных сталей на коротких цилиндрических оправках. Следует отметить, что в ходе данной операции формируется качество внутренней поверхности горячекатаных труб.

В связи с вышеизложенным, исследование технологии раскатки и 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 ICMTMTE 2021.

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель исследований, поставлены задачи для ее достижения, раскрыта научная новизна и практическая значимость, представлена структура работы.

В первой главе работы приведен научно-технический обзор на основе литературы и публикаций по технологии производства горячекатаных бесшовных труб малого диаметра из коррозионностойких сталей на станах винтовой прокатки, и износостойкости рабочего инструмента. Проанализированы результаты исследований таких ученых, 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, С. П. Галкин, А. В. Курятников, А. А. Богатов, Е. И. Шифрин, Д. В. Овчинников, А. Л. Марченко и др.

Подробно рассматриваются способы раскатки гильз в черновые трубы из коррозионностойких марок стали на станах винтовой прокатки и особенности их эксплуатации. Показано, что современные технологии позволяют получать трубы с превосходным над иными существующими методами качеством геометрии труб. При этом оборудование обладает высокой манёвренностью при переходе на прокатку трубной продукции другого типоразмера. Однако, увеличение спроса на высококачественные трубы малого диаметра из коррозионностойких сталей и сплавов вызывает необходимость разработки и введения в практику новой технологической схемы производства бесшовных труб на станах винтовой прокатки с обеспечением заданной точности, геометрических параметров и высоким качеством внутренней поверхности. Данная проблема может быть решена применением новой технологической схемы раскатки в двухвалковых станах винтовой прокатки с направляющими линейками. Практика прокатки труб из коррозионностойких сталей по новой технологической схеме показала, что особое внимание необходимо уделять

износу оправок и направляющих линеек. Известно, что изношенное состояние оправок может привести к образованию неустраняемых дефектов внутренней поверхности, снижению производительности процесса и увеличению себестоимости производства.

Во время эксплуатации оправки подвергаются длительному интенсивному циклическому воздействию высоких давлений, термических напряжений, вызванных быстрым нагревом рабочей поверхности с последующим охлаждением. На износостойкость оправок оказывают взаимное влияние ряд технологических факторов процесса раскатки, а также, материал и способы изготовления инструмента. Несмотря на поднятые вопросы, освещенные в многочисленных работах о повышении стойкости коротких оправок стана, исследование износостойкости в процессе раскатки труб практически не изучено и требует проведения дополнительных исследований.

Поэтому проведение исследования, направленного на выбор рациональных режимов прокатки, приемлемых материалов оправок для повышения их износостойкости, с обеспечением высокого качества труб, является актуальной задачей.

Вторая глава посвящена исследованию влияния технологических параметров процесса раскатки труб методом конечных элементов на износ коротких цилиндрических оправок двухвалкового стана МИСиС-130Д. Основываясь на ранее проведенных в НИТУ «МИСиС» работах, были выбраны основные технологические факторы процесса раскатки, оказывающие влияние на особенности деформации металла, качество получаемых труб и пределы их варьирования (таблица 1).

Основными технологическими факторами, позволяющими получать высококачественные трубы, варьируемыми в производственных условиях на стане винтовой прокатки являются: коэффициент вытяжки, угол подачи рабочих валков, а также коэффициент овализации гильзы в очаге деформации.

Таблица 1 – Уровни варьирования основных технологических факторов

| Фактор | Уровни варьирования | | |
|-------------------------------|---------------------|------|------|
| | -1 | 0 | 1 |
| Угол подачи, β | 10° | 12° | 14° |
| Коэффициент вытяжки, μ | 1,52 | 1,68 | 1,84 |
| Коэффициент овализации, ξ | 1,08 | 1,12 | 1,16 |

Процесс исследовали методом конечных элементов с использованием программы Qform. Процесс раскатки гильз диаметром 73 мм с толщиной стенки 8-10 мм из стали 12X18H10T в трубы размерами $D_T \times S_T = 62 \times 6$ мм на оправке диаметром 50 мм, смоделирован с частотой вращения валков 57 об/мин и обжатием в пережиме $U_{\Pi} = 14$ % (рисунок 1–а). Износ оправок в виде глубины изношенного металла определен с помощью стандартной подпрограммы в QForm (рисунок 1–б).

Результаты показали, что увеличение угла подачи приводит к увеличению ширины контакта оправки с заготовкой. Вследствие чего увеличиваются площадь контактной поверхности с гильзой и осевое усилие металла на оправку. В то же время повышение угла подачи ведет к снижению машинного времени прокатки. Очевидно, что сокращение машинного времени прокатки может привести к существенному снижению разогрева поверхности оправки и позволит повысить износостойкость.

Установлено, что уменьшение коэффициента овализации в очаге деформации также оказывает влияние на площадь контакта оправки с горячим металлом, что ведет к увеличению температуры рабочей поверхности оправки и осевого усилия металла на оправку. В ходе моделирования процесса раскатки труб из коррозионностойкой стали фиксировали длительность контакта оправок

с прокатываемым металлом. Установлено, что его увеличение резко снижает износостойкость оправок (рисунок 2).

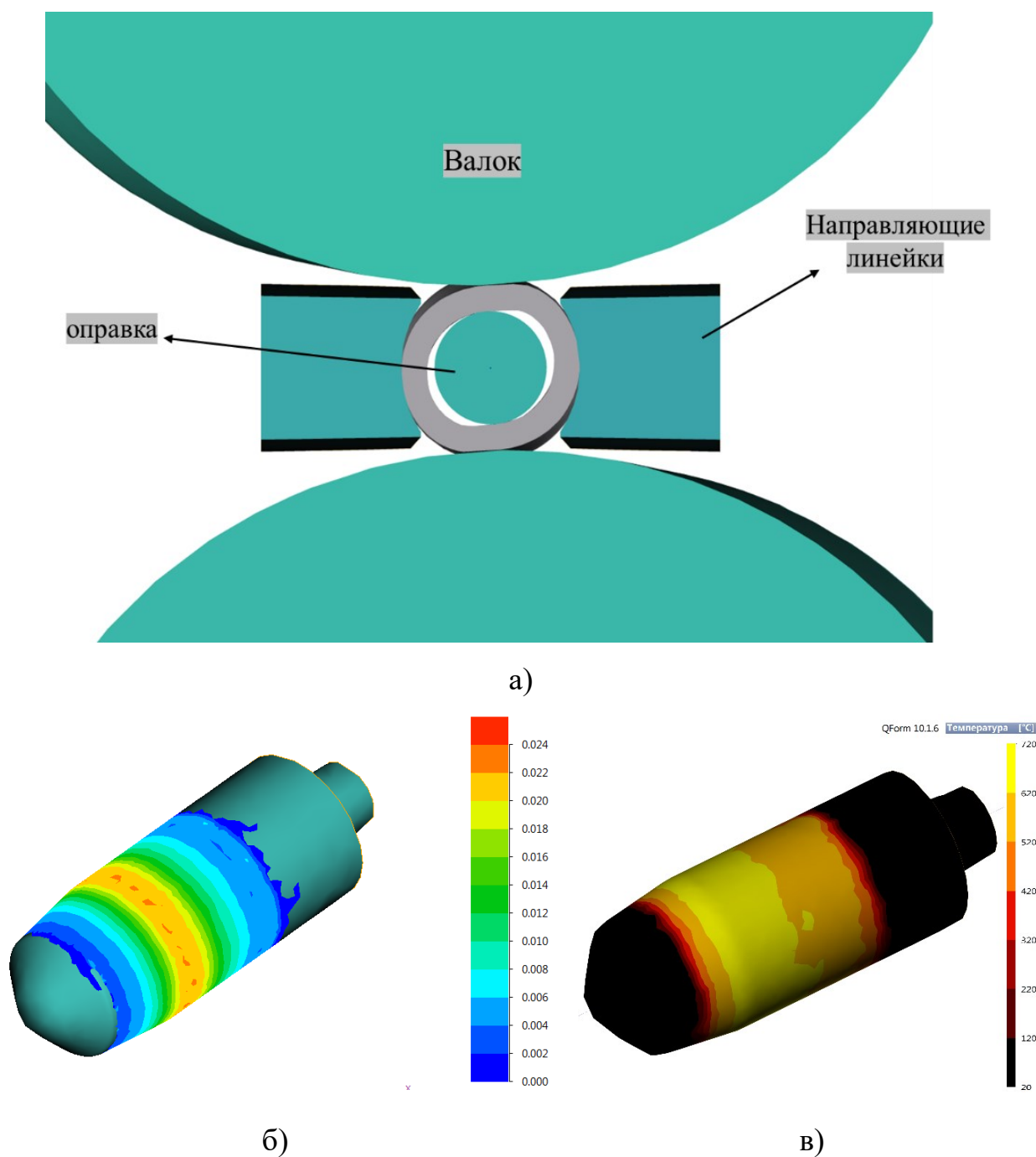
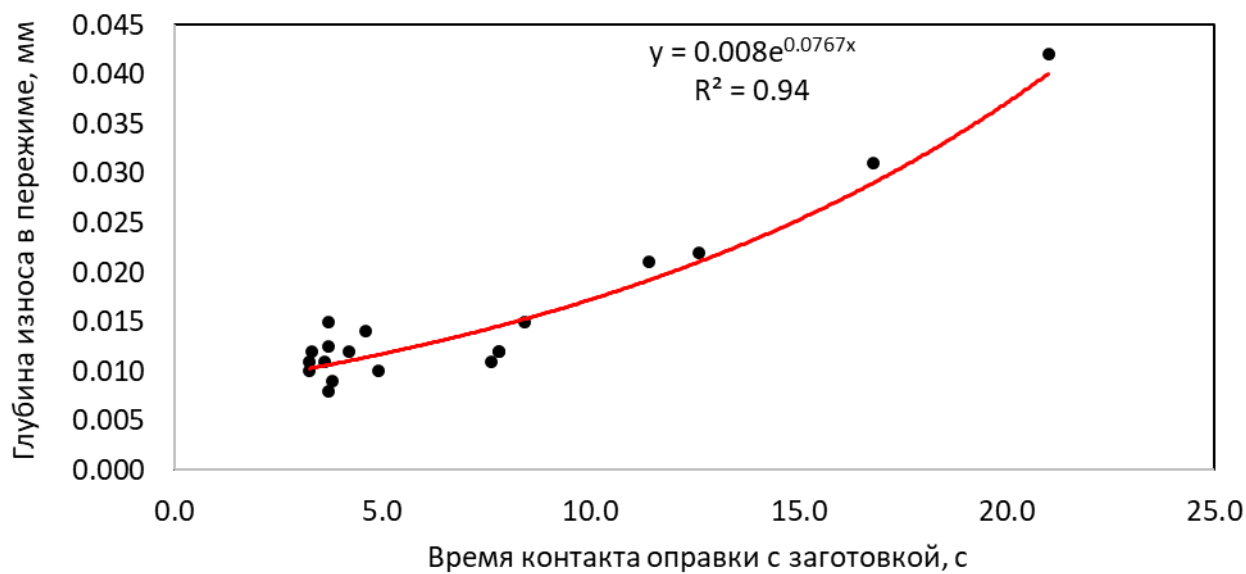
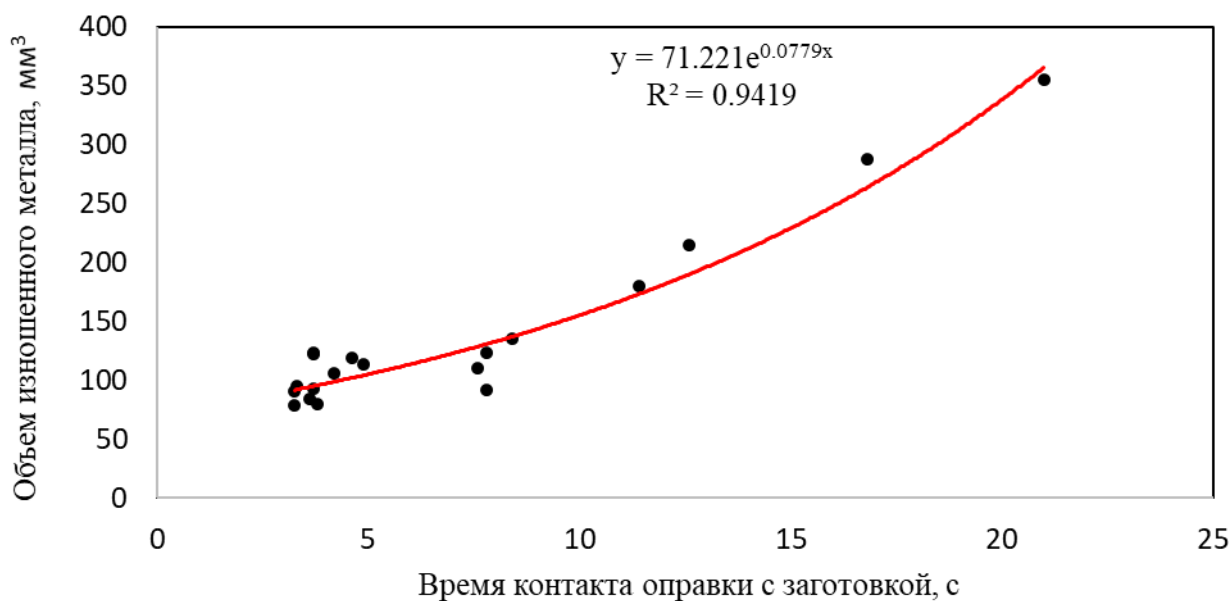


Рисунок 1 – Очаг деформации (а) стана МИСиС-130Д, распределение износа (б) и температуры (в) рабочей поверхности по длине оправки



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимость глубины износа (а) и объема изношенного металла оправок (б) в переежме от длительности контакта с заготовкой

Основываясь на результатах, полученных компьютерным моделированием, построена взаимосвязь технологических факторов с глубиной износа оправки.

$$h = f(\beta, \mu, \xi) \quad (1)$$

где h – глубина износа рабочей поверхности оправки, мм

В результате математической обработки данных зависимость (1) можно представить уравнением:

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

Представленные на рисунке 3 графики отражают влияние исследованных факторов на глубину износа оправок на участке максимального износа, соответствующего переходу от конусной к цилиндрической части оправки. Анализ показал, что наиболее значимым фактором, оказывающим влияние на максимальный износ в рассматриваемой зоне, является коэффициент вытяжки. Выявлено, что увеличение обжатия по толщине стенки ведет к снижению износостойкости оправок. С другой стороны, отмечено, что износостойкость оправок снижается с уменьшением угла подачи и коэффициента овализации.

Основываясь на результатах моделирования, выявлено влияние основных технологических факторов на износостойкость оправок, и определены рациональные режимы прокатки, обеспечивающие меньший износ их поверхности при: углах подачи $\beta = 12^\circ \dots 14^\circ$, коэффициентах вытяжки и овализации $\mu = 1,52 \dots 1,6$, и $\zeta = 1,11 \dots 1,13$, соответственно.

Проведено моделирование процесса раскатки на короткой контролируемо-перемещаемой цилиндрической оправке. Представленный результат на рисунке 4 показывает, что передвижение оправки вдоль оси прокатки позволяет сокращать время её контакта с заготовкой, при этом длина зоны износа увеличивается. Показано, что с увеличением скорости перемещения оправки против хода прокатки износ происходит менее интенсивно и более равномерно

по длине. При этом применение контролируемо-перемещаемой оправки также позволяет снизить осевое усилие на оправку.

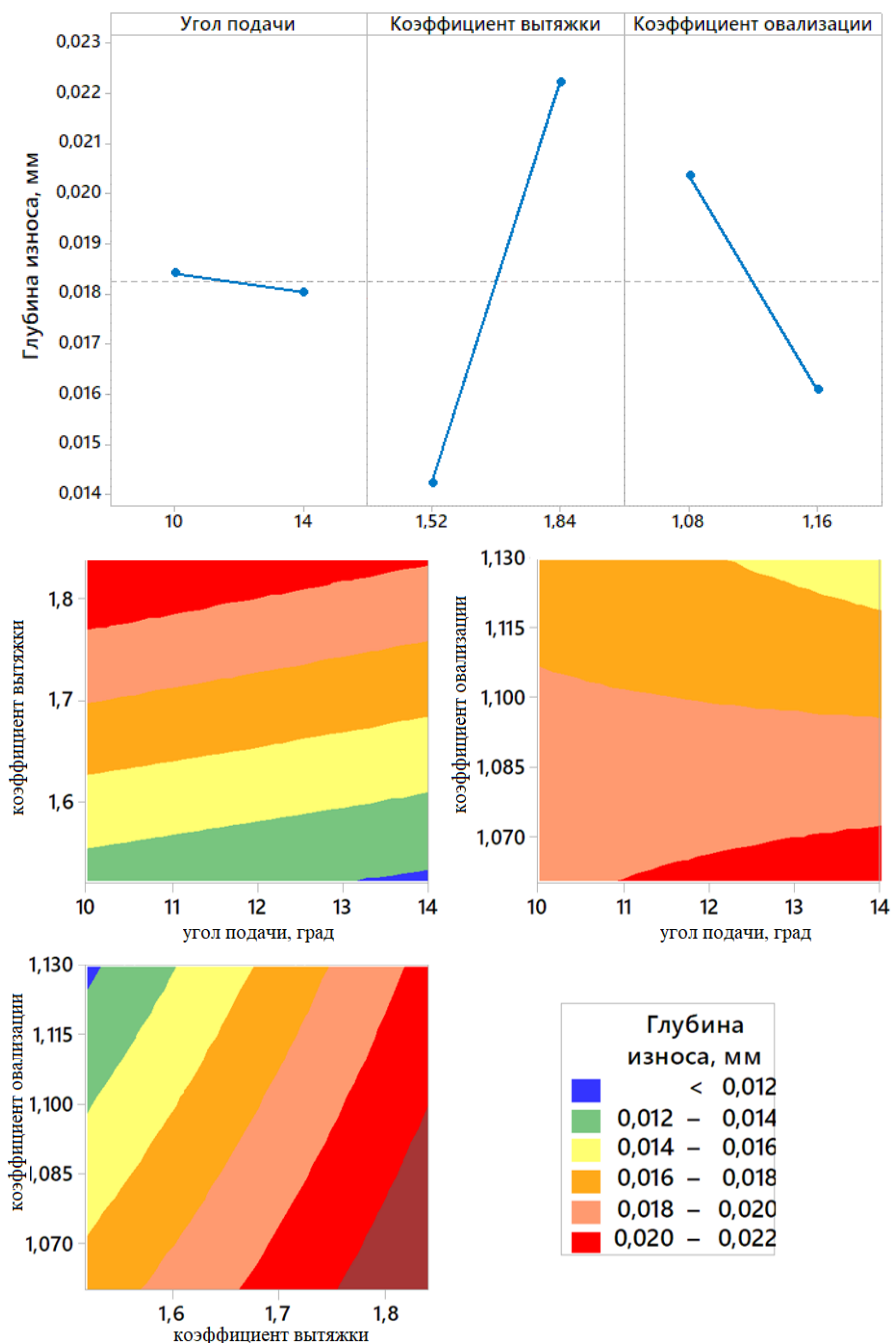
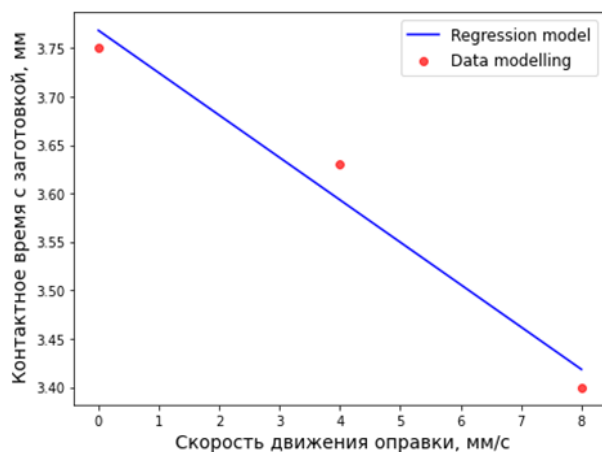
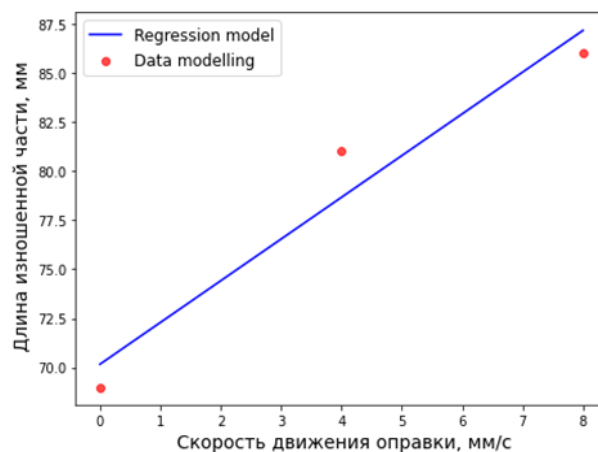


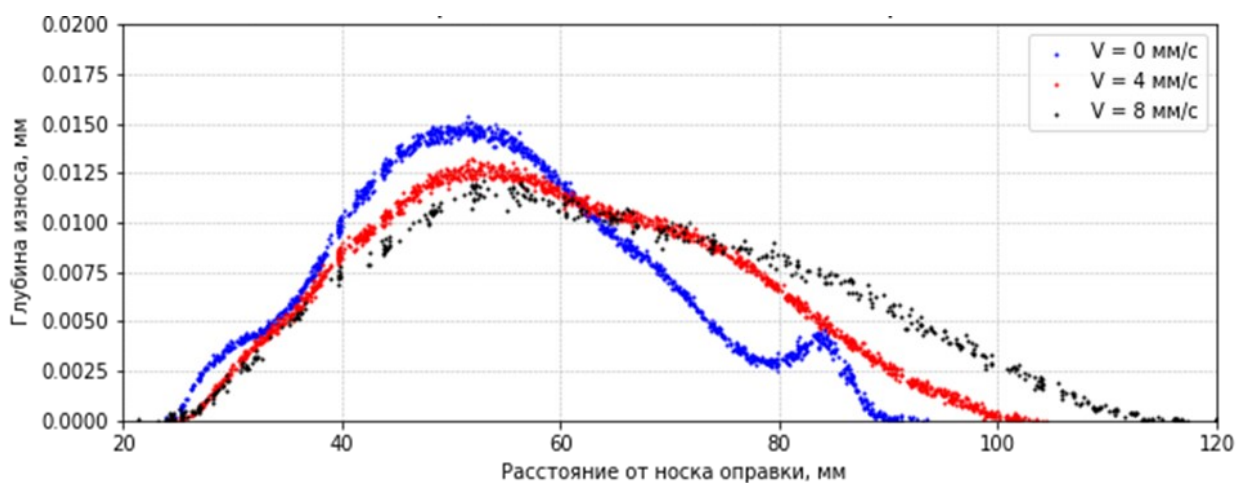
Рисунок 3 – Влияние технологических факторов процесса раскатки на износ оправок



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Время контакта оправки с металлом (а), длина изношенной части оправки (б), распределение износа по длине контролируемо перемещаемых оправок (в)

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса раскатки гильз на стане МИСиС-130Д из коррозионностойкой стали 20Х13 на короткой оправке.

Опробованная технология прокатки труб из высокохромистой коррозионностойкой стали на стане МИСиС-130Д заключается в прошивке заготовок в гильзы и их раскатке в трубы на короткой оправке. В ходе выполнения исследования, заготовки диаметром 60 мм из стали 20Х13

прошивали в гильзы диаметром 61...70 мм с различной толщиной стенки на оправках диаметром 46 мм и 43,5 мм с направляющими линейками (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры процесса прошивки на стане МИСиС-130Д

| Диаметр заготовки D_z , мм | Угол подачи β , град | Обжатие в пережиме U_n , % | Обжатие перед носком U_0 , % | Коэффициент овализации ξ | Диаметр гильзы D_g , мм | Толщина стенки гильзы S_g , мм | Диаметр оправки $D_{опр}$, мм | Температура прокатки T , °С |
|------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 60 | 12 | 11 | 7 | 1,11-1,13 | 70 | 9 | 46 | 1180–1200 |
| 60 | 12 | 11-12 | 6-8 | 1,11-1,13 | 61 | 8 | 43,5 | 1180–1200 |

Экспериментальная раскатка гильз в черновые трубы осуществлена по двум маршрутам, с указанными в таблице 3 основными параметрами настройки стана. По первому маршруту полученные исходные гильзы диаметром 70 мм подвергали раскатке на короткой цилиндрической оправке диаметром 50 мм в трубы размерами $D_T/S_T = 62 \times 6$ мм. По второму маршруту гильзы диаметром 61 мм прокатывали в трубы размерами $D_T/S_T = 55 \times 6$ мм на оправке диаметром 42 мм. Раскатка осуществлялась партиями из 8 труб на оправках из разных марок сталей: 4Х5МФС, 3Х3МЗФ, 5Х3ВЗМФС, 20Х2Н4А. В рамках экспериментального исследования было прокатано 45 труб с отношением $D_T/S_T < 12$. При их визуальном осмотре не выявлено дефектов на внутренней и наружной поверхностях. Для оценки точности труб после прокатки осуществлено измерение геометрических размеров после их охлаждения на воздухе до комнатной температуры.

Относительная разностенность гильз после прошивки заготовок из стали 20Х13 составила не более 5%. Оценка точности полученных труб по двум маршрутам прокатки показала, что их разностенность находилась в пределах 1,8...3,5%. Статистическая обработка полученных результатов позволила установить влияние разностенности исходных гильз (рисунок 5) на разностенность труб из стали 20Х13.

Таблица 3 – Параметры настройки стана МИСиС-130Д для процесса 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 |

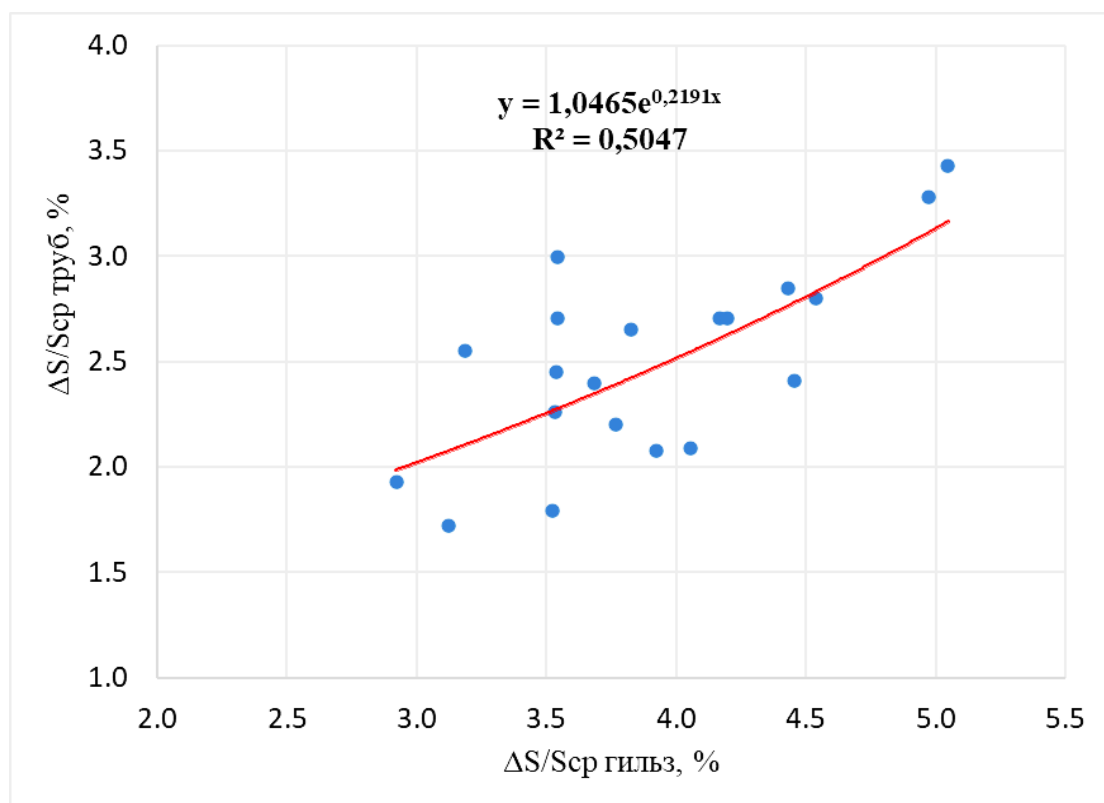


Рисунок 5 – Зависимость разностенности труб от разностенности гильз

Выявлено, что повышенная разностенность исходных гильз, возможно, является причиной, вызывающей увеличение разброса толщины стенки получаемых труб. Замечено, что при разностенности гильз до 4,5%, разностенность труб после раскатки по применяемому режиму находится в пределах 1,8...3%, при разностенности исходных гильз более 5%, разностенность труб составляет около 3,5%.

В ходе исследований проведена оценка качества внутренней поверхности труб из коррозионностойкой стали 20Х13 после раскатки исходных гильз на

разных оправках. Среднее значение шероховатости на внутренней поверхности труб, полученных при раскатке на наиболее износостойких оправках (шероховатость поверхности после 8 раскатанных гильз $R_a = 0,8$ мкм) составляет $R_a = 3,2$ мкм. В то же время после раскатки на оправке со средней шероховатостью рабочей поверхности $R_a = 1,2$ мкм получены трубы с величиной шероховатости $R_a = 3,5$ мкм. А при использовании новой оправки с шероховатостью рабочей поверхности $R_a = 0,8$ мкм получена поверхность труб с $R_a = 3,0$ мкм. В связи с этим установлено, что применение оправок с высоким качеством рабочей поверхности при раскатке гильз из коррозионностойких сталей позволяет повысить качество внутренней поверхности труб.

В процессе исследования зафиксировали кинематические и энергосиловые параметры процесса раскатки труб из высокохромистой стали. Экспериментально получено значение коэффициента осевой скорости металла, равное $\eta_0 = 0,53...0,55$. На основании фактических токовых нагрузок, зафиксированных при выполнении эксперимента, и с использованием измеренных данных заторможенной в очаге деформации заготовки, и реологических свойств стали 20X13 определены энергосиловые параметры процесса раскатки.

Сравнительный анализ результатов, полученных при экспериментальной раскатке и моделировании в программе Qform позволяет оценить и корректировать точность расчетов путем сопоставления некоторых параметров процесса моделирования с их реальной величиной.

В четвертой главе представлено экспериментальное исследование износостойкости коротких цилиндрических оправок и влияние материала оправок на их рабочий ресурс при раскатке труб из коррозионностойкой стали 20X13.

Износостойкость оправок, изготовленных из различных материалов исследована при раскатке гильз из стали 20X13 с коэффициентом вытяжки 1,5. В качестве варьируемого фактора служит материал, из которого изготовлены

оправки. При прокатке испытывали партии по 8 труб на каждой оправке, изготовленной из сталей марок 4Х5МФС, 3Х3М3Ф, 5Х3В3МФС, 20Х2Н4А, и 20Х2Н4А с нанесенными композиционными покрытиями методом холодного газодинамического напыления.

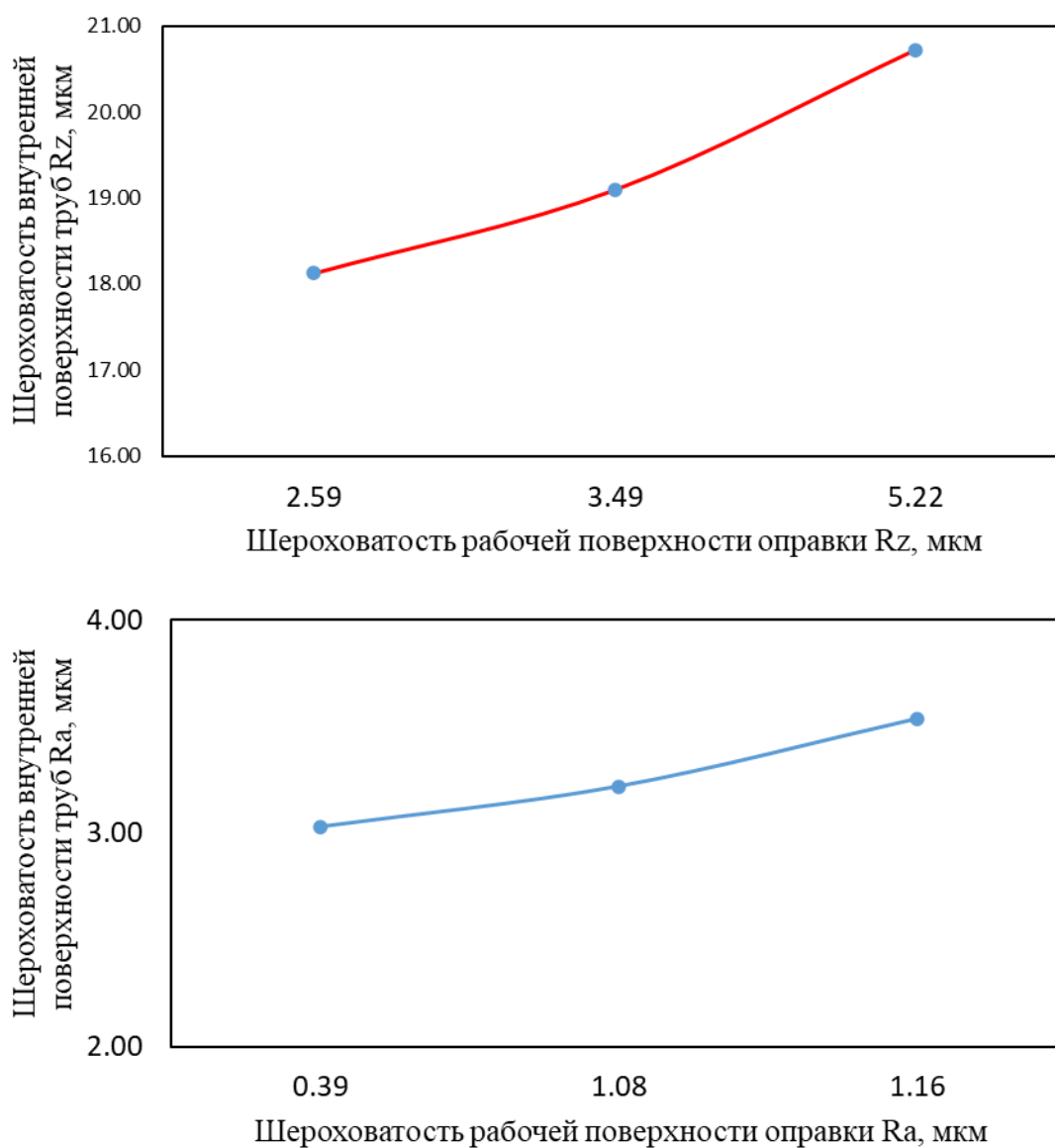


Рисунок 6 – Зависимость качества внутренней поверхности труб от состояния рабочей поверхности оправок

Таблица 4 – Экспериментальные материалы исследуемых коротких оправок

| № | Марка стали | $C_{\text{ЭКВ}}$ |
|---|------------------------------------|------------------|
| 1 | 4X5МФС | 2.05 |
| 2 | 3X3МЗФ | 1,94 |
| 3 | 5X3В3МФС | 1,69 |
| 4 | 20X2Н4А | 0,76 |
| 5 | 20X2Н4А (с нанесенными покрытиями) | - |

Перед прокаткой оправки были термообработаны для создания на их рабочей поверхности окисленного слоя, служащего дополнительным термическим сопротивлением на площади физического контакта прокатываемого металла и инструмента. На каждой оправке раскатывали четыре партии по 2 трубы. После каждой партии охлажденные оправки взвешивали с фиксацией изменения массы, диаметральных размеров и проведением фотофиксации (рисунок 7).

Выявлено, что с точки зрения состояния рабочей поверхности оправок после прокатки, наиболее приемлемым материалом из исследованных является сталь 4X5МФС. Также стоит заметить, что оправка из стали 20X2Н4А с нанесенным покрытием методом холодного газодинамического напыления остается в похожем состоянии, как и оправка из стали 4X5МФС. Визуальный осмотр внешнего вида оправок после проведения прокаток показал, что состояние поверхности оправок, изготовленных из сталей 5X3В3МФС, 3X3МЗФ, и 20X2Н4А соответственно ухудшается с увеличением числа проходов из-за налипших частиц прокатываемого металла.

Уровень износа оправок в виде глубины удаленного металла рассмотрен с использованием данных измерения диаметральных размеров после раскатки каждой партии (рисунок 8). Установлено, что в зоне налипания металла увеличивается их начальный диаметр, а на цилиндрической части наблюдается уменьшение диаметра на 0,02...0,05 мм после восьми проходов. Среди использованных в исследовании оправок, после проведения 8 прокаток,

наибольшему износу подвергалась оправка, изготовленная из стали марок 20Х2Н4А, глубина износа составила 0,04...0,05 мм.



Рисунок 7 – Внешний вид оправок до (а) и после (б) раскатки гильз в трубы из стали 20Х13, количество проходов - 8

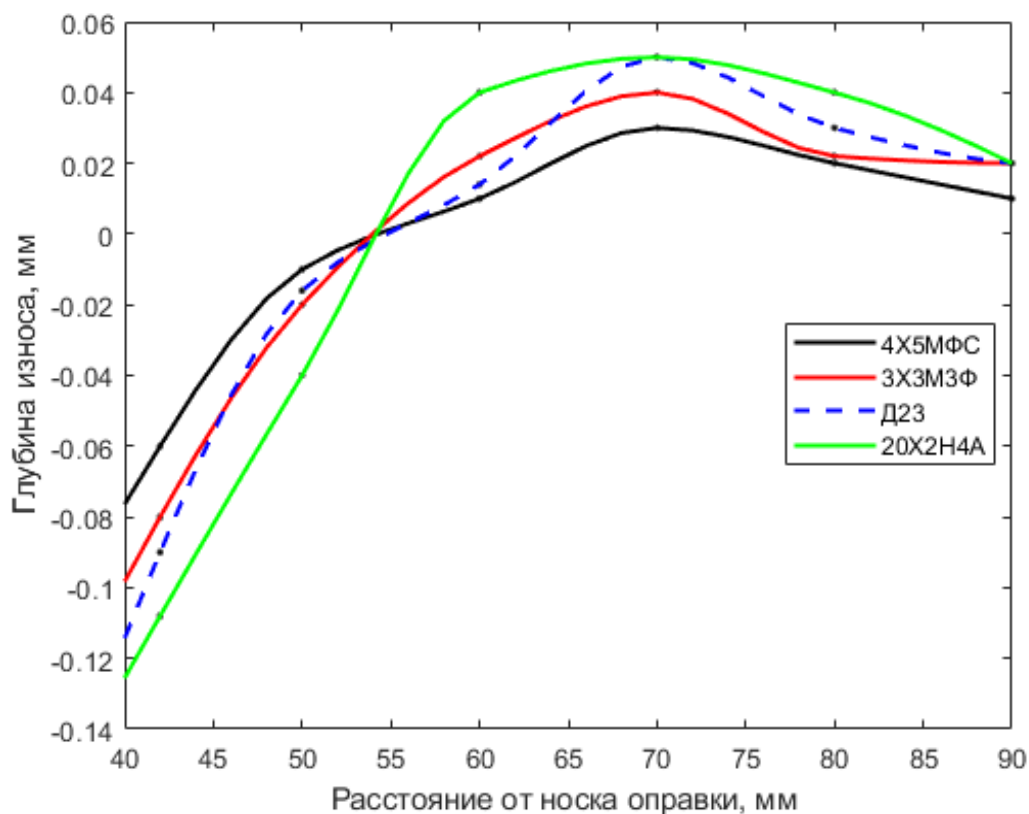


Рисунок 8 – Изменение диаметра оправок по длине на рабочей поверхности после 8 прокатанных труб

Анализ показал, что рабочие поверхности оправок, изготовленных из стали 4X5МФС и подвергнутых напылению методом холодного газодинамического напыления (ХГН) имеют наименьший износ до 0,03 мм. Таким образом, с точки зрения уменьшения диаметра оправок после прокаток, износ на поверхности можно минимизировать применением отжига оправки из стали марок 4X5МФС, или нанесением на поверхность оправок жаропрочных композитов методом ХГН. На рисунке 9 показано влияние углеродного эквивалента на изменение массы оправок, и величины материалостойкости. Установлено, что более высокий углеродный эквивалент материала оказывает положительное влияние на материалостойкость оправок.

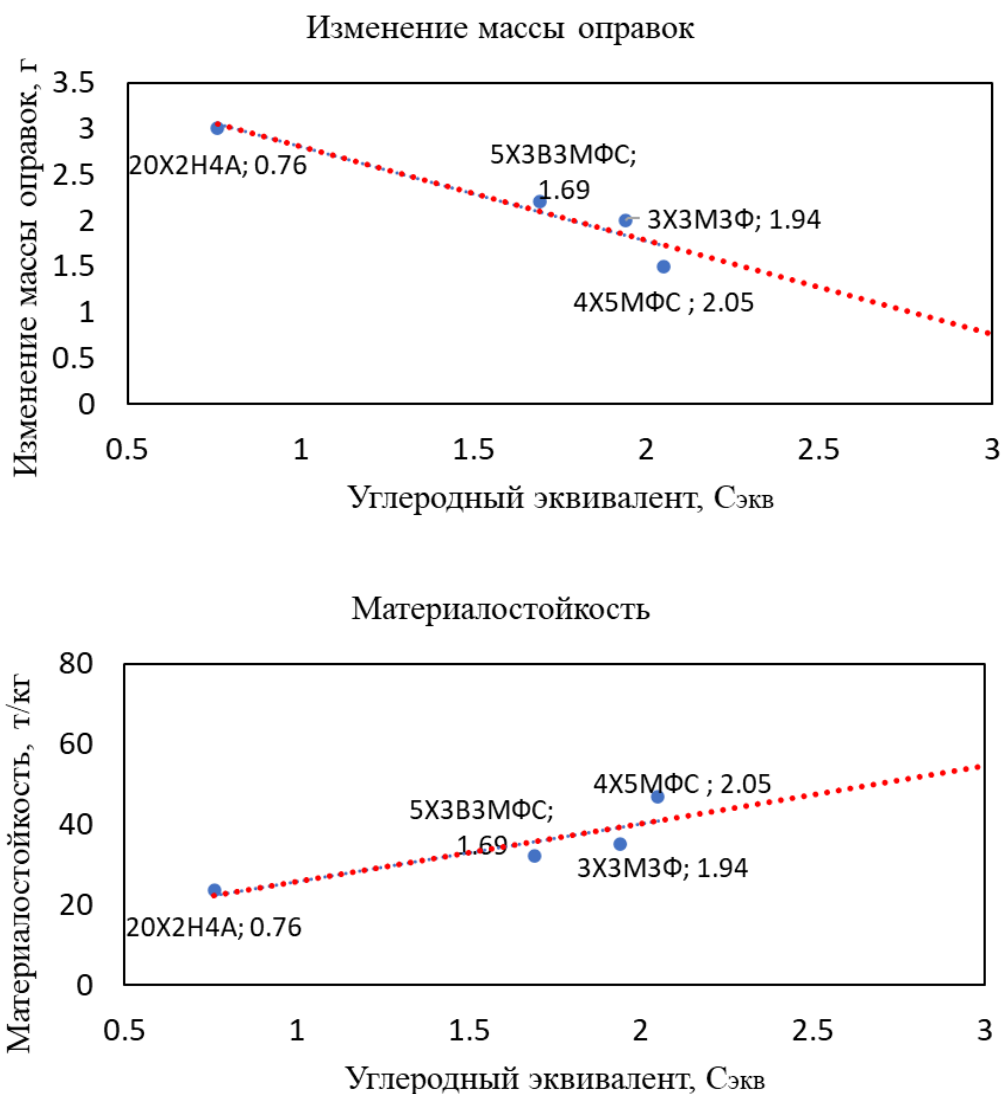


Рисунок 9 – Изменение массы оправок и их материалостойкости в зависимости от углеродного эквивалента

В результате фиксации массы оправок, в ходе эксперимента были получены следующие результаты. После прокатки потеря массы, зафиксированная у оправки из стали 4X5MFC составила 1 грамм, а масса оправок, изготовленных из сталей 3X3M3F, 5X3B3MFC уменьшалась на 2 грамма. Оправка, которая потеряла наибольшее количество металла в процессе прокатки изготовлена из стали 20X2H4A - потеря массы 3 грамма. Установлено, что потеря массы оправок уменьшается с увеличением углеродного эквивалента их материала. Такая характерная зависимость указывает на то, что увеличение

углеродного эквивалента материала оправок способствует снижению склонности к свариванию их металла с прокатываемым металлом в условиях высокой температуры и удельных усилий, и, следовательно, приводит к повышению их износостойкости.

Для оценки времени вывода из эксплуатации оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей была разработана методика расчета, в которой изношенный объем материала оправок без учета налипшего деформируемого металла, определяется уравнением:

$$V_{\text{и}} = K_{\text{и}} \cdot \pi \cdot D_{\text{опр}} \cdot B \cdot h_{\text{и}} \quad (3)$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент, определяющий отношение длины участка, в котором отсутствует налипание металла на поверхности к среднему пути скольжения прокатываемого материала по оправке при раскатке одной трубы (B);

$h_{\text{и}}$ – максимальная глубина износа; $D_{\text{опр}}$ – диаметр оправки.

Итоговое уменьшение массы оправок после раскатки труб из стали 20Х13, полученное по предложенной методике указано в таблице 5. Проведен расчет объема металла, удаленного за все время прокатки с контактной поверхности оправки вследствие образования и последующего разрушения адгезионных металлических связей с прокатываемым металлом по формуле, предложенной Л. Г. Степанским:

$$Q = N \cdot B \cdot L_c \cdot \delta \cdot \frac{\sigma_{s_2}^2}{\sigma_{s_1}^2 + \sigma_{s_2}^2}, \quad (4)$$

где δ – средняя толщина зоны разрушения адгезионной металлической связи на поверхности оправки, принимается равной $\delta \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ м;

B – средний путь скольжения прокатываемого материала по оправке при раскатке одной трубы; σ_{s1} – предел текучести материала инструмента в контактном слое; σ_{s2} – предел текучести обрабатываемого материала в температурно-скоростных условиях деформирования; L_c – путь скольжения металла относительно вращающейся оправки при раскатке одной гильзы.

При раскатке трубы длиной l_T , оправка вращается во время деформации с частотой U . При этом путь скольжения металла возможно принять равным:

$$L_c = 2U \cdot (l_T + S_{cp} \cdot n), \quad (5)$$

где S_{cp} – величина шага винтовой линии; n – количество шагов винтовой линии на длине трубы.

Значения изменения массы оправок, полученных по формуле (4) крайне мало, кратно меньше реальных значений, зафиксированных в эксперименте. Расчеты по формуле, предложенной Л. Г. Степанским, показали ограниченность ее использования для определения и прогнозирования износа оправок при раскатке труб из коррозионностойких марок сталей.

Таблица 5 – Данные об износе металла оправок после прокатки

| Сталь | Снижение массы оправки $Q \cdot \rho$, г (По Л. Г. Степанскому) | Снижение массы оправки $V_n \cdot \rho$, г | Изменение массы оправок, г |
|---------|---|---|----------------------------|
| 4X5МФС | 0.05 | 1.8 | 1 |
| 3X3МЗФ | 0.1 | 2.1 | 2 |
| ДИ23 | 0.2 | 2.5 | 2 |
| 20X2Н4А | 0.3 | 2.4 | 3 |

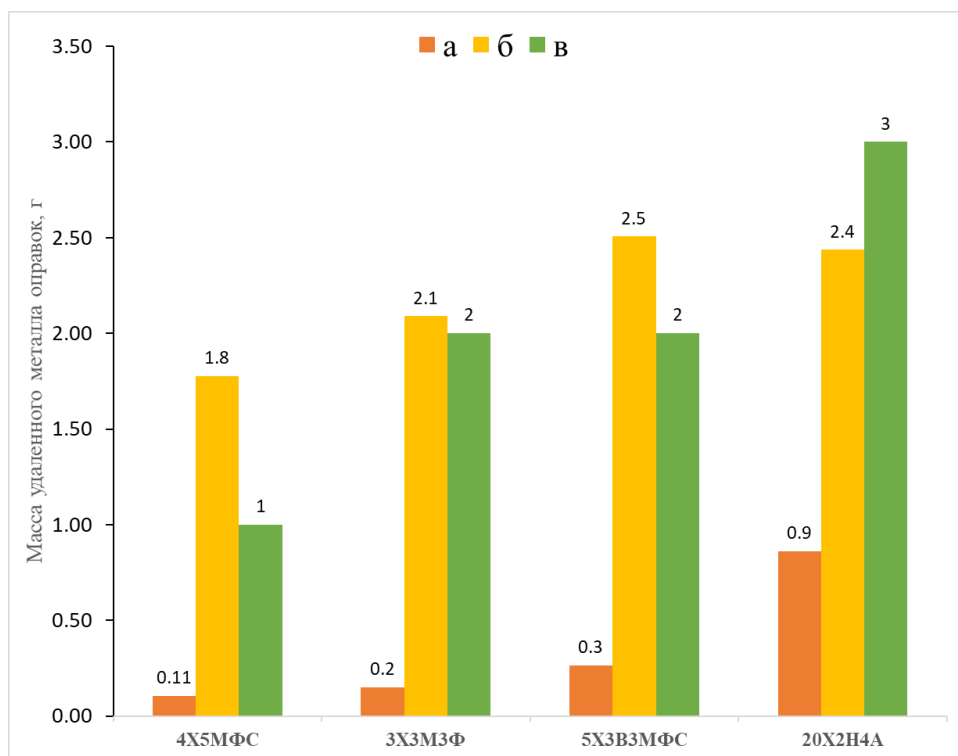


Рисунок 10 – Снижение массы оправок после раскатки

а - расчет по формуле Л.Г. Степанского, б – расчет по предлагаемой методике, в – фактические показатели изменения массы

Представленные результаты расчета из рисунка 10 показали, что применять методику, предложенную Л. Г. Степанским, на основе образования и последующего разрушения адгезионных металлических связей, для расчета изношенного металла оправок при прокатке труб из коррозионностойких сталей нецелесообразно. Разработанная методика расчета удаляемой массы металла с учетом налипания металла на оправку позволяет с большей точностью определить время вывода из строя эксплуатации оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнено моделирование процесса раскатки труб методом конечных элементов с использованием программного комплекса Qform 3D, 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 ее длине. 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 в условиях проведенного эксперимента изменяется в пределах 1,8...3%, при этом разностенность труб увеличивается до 3,5% при разностенности исходных гильз больше 5%.

4. Исследовано влияние состояния рабочей поверхности оправок на качество внутренней поверхности полученных на них труб из коррозионностойкой стали. Установлено, что с увеличением углеродного

эквивалента материала, из которого изготавливаются оправки, повышается материалостойкость инструмента. Применение оправок из стали 4X5МФС с высоким качеством рабочей поверхности позволяет получить трубы с шероховатостью внутренней поверхности в пределах Ra 3,2-3,5 мкм.

5. Разработана методика расчета изношенной массы оправки с учетом налипания прокатываемого металла, позволяющая с высокой точностью прогнозировать момент вывода из эксплуатации оправок при раскатке труб из коррозионностойких сталей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. **Нгуен Куанг**, Алещенко А. С., Гусейнов Э. Р. Исследование процесса нанесения покрытия из порошковой смеси $Al + Al_2O_3$ методом холодного газодинамического напыления на подложки с различной шероховатостью поверхности. Цветные металлы. 2021. №7. Стр. 52 -57.

Kuang, N., Aleshchenko, A. S., Guseynov, E. R. Investigation of the coating process of the powder mixture ($al + Al_2O_3$) by the cold gas-dynamic spraying on substrates with various surface roughness. Tsvetnye Metally, 2021(7), 52-57.

2. Алещенко А. С, **Нгуен Куанг**. Исследование износа цилиндрических оправок раскатного стана винтовой прокатки. Черные металлы. 2021. №6. Стр. 27 – 31.

Aleshchenko, A. S., **Kuang, N.** Study of wear of cylindrical plugs of a helical rolling mill. Chernye Metally, 2021(6), 27-31.

3. **Quang Nguyen**, Aleshchenko A. S. FEM-Based Comparison of Mandrel Wear Resulting from Elongation of Pipes Manufactured from Various Materials on a Two-Roll Screw Rolling Mill/ Materials Science Forum. 2022(1049), 96-10.

4. **Quang Nguyen**, A.S. Aleshchenko. Research on the Mandrel Wear of a Screw Rolling Piercing Mill by the Finite Element Method/ Key Engineering Materials. 2022(910), 381-387.