

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт

Факультет Материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент

Заведующий кафедрой

_____ Л.В. Радионова

«_____» _____ 20__ г.

«_____» _____ 20__ г.

Тема работы: «Повышение срока службы оправок двухвалкового прошивного
стана за счёт исследования их теплового состояния при прошивке
заготовок»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

ЮУРГУ-22.04.02-2018-188-00.00.00 ПЗ

Руководитель работы:

_____ / А.В. Выдрин /
Автор работы

_____ / А.И. Маннанов /

студент группы П-244

Челябинск

2018

АННОТАЦИЯ

Маннанов А.И. Повышение срока службы оправок двухвалкового прошивного стана за счет исследования их теплового состояния при прошивке заготовок. – Челябинск: ЮУрГУ, П-244; 2018, 62 с., 37 ил., 9 табл., библиографический список – 53 наим.

В данной выпускной квалификационной работе проведено исследование теплового состояния оправок прошивного стана за счет проведения физического и компьютерного моделирования. Проанализировано влияние факторов на износостойкость и жаростойкость оправок. Оценены различные конструкции устройства оправок.

Разработано техническое решение, позволяющее повысить срок службы оправок прошивного стана.

СОДЕРЖАНИЕ

1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСКАТА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА ДВУХВАЛКОВЫХ ПРОШИВНЫХ СТАНАХ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ОПРАВКЕ.....	7
1.2 Теоретические основы процесса двухвалковой винтовой прошивки труб	7
1.2.1 Производство бесшовных труб.....	7
1.2.2 Прошивка труб	7
2. Обзор научно-технической литературы.....	17
2.1 Характеристика условий эксплуатации и износа прошивных оправок	17
2.2 Существующие способы увеличения износостойкости оправок.....	21
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО СТАНА	25
3.1 Постановка задач физического моделирования.....	25
3.2 Оборудование для физического моделирования	25
3.3 План проведения эксперимента.....	30
3.3.1 Расчет времени нагрева оправки в печи	30
3.3.2 Определение количества проходов, необходимого для выхода оправки в стационарный температурный режим	34
3.4 Анализ полученных данных.....	37
4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУХВАЛКОВОЙ ПРОШИВКИ.....	38
4.1 Задачи компьютерного моделирования.....	38
4.2 Выбор параметров оправок для проведения компьютерного моделирования	38
4.3 Сравнительный анализ существующих способов исследования температурных полей технологического инструмента.....	40
4.4 Компьютерное моделирование процесса двухвалковой прошивки	44
4.5 Анализ результатов моделирования.....	48

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОПРАВОК.....	52
5.1 Внедрение составных оправок с носком, изготовленным из жаростойких материалов	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	56

ВВЕДЕНИЕ

Оправка прошивного стана является тяжело нагруженным рабочим инструментом прошивных станов поперечно-винтовой прокатки и непосредственно влияет на качество внутренней поверхности гильзы, что в свою очередь определяет качество получаемой трубы. Оправка подвергается воздействию высоких температур, а также касательному и нормально износу при прошивке.

Водоохлаждаемые оправки, при некотором усложнении конструкции выходной стороны прошивного стана более эффективны, а их износостойкость вполне удовлетворительна. Однако, при прошивке легированных сталей она резко снижается и в некоторых случаях становится критической. Используемые для изготовления оправок конструкционные инструментальные стали не вполне удовлетворяют более жестким условиям эксплуатации, а известные способы увеличения их износостойкости не всегда эффективны.

Интенсивный износ оправки при прошивке легированных сталей наступает из-за пластической деформации ее носка, когда удельные усилия на контактной поверхности превышают сопротивление деформации материала оправки при температуре, до которой она разогревается. Трещины в виде сетки разгара образуются на оправке из-за термических напряжений циклического характера, появляющихся при нагреве во время прошивки и охлаждения, в паузах между проходами. Оплавление рабочей поверхности оправки и налипание металла характерно в основном при прошивке гильз из тугоплавких материалов и нержавеющей сталей.

Таким образом, одним из основных факторов определяющим стойкость оправок является уровень температуры и её распределение по объёму прошивного инструмента.

В связи с вышеизложенным исследования направленные на увеличение износостойкости прошивных оправок являются весьма актуальной научно-технической задачей, решению которой и посвящена настоящая работа.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ технологий и особенностей раската непрерывнолитых заготовок на двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки.

2. Для более точного понимания процесса, а также получения реальных показателей скорости охлаждения и нагрева оправки, провести физическое моделирование процесса нагрева оправки двухвалкового прошивного стана.

3. Провести компьютерное моделирование процесса для определения влияния технологических параметров на температурное состояние, а также степень износа оправки.

4. Провести исследования по стойкости оправок прошивного стана и определить значимые факторы, оказывающие влияние на износ.

5. Разработать техническое решение по увеличению стойкости оправок прошивного стана.

1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСКАТА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА ДВУХВАЛКОВЫХ ПРОШИВНЫХ СТАНАХ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ОПРАВКЕ

1.2 Теоретические основы процесса двухвалковой винтовой прошивки труб

1.2.1 Производство бесшовных труб

Основными технологическими операциями при производстве стальных горячекатанных бесшовных труб являются прошивка (сверление; сверление и экспандирование) из литой, катанной или кованой заготовки полой гильзы и получение из гильзы трубы. После прокатки (прессования) гильзы в трубу, для повышения точности трубы, используются калибровочные и редуцирующие станы. В дальнейшем, горячедеформированные бесшовные трубы могут использоваться в качестве заготовки (передельная труба) для реализации процессов холодной прокатки и волочения.

Способы прокатки труб обычно классифицируются по типу используемого прокатного стана для раскатки гильзы в тонкостенную трубу. Известны трубопрокатные агрегаты с пилигрмовым станом, автоматическим станом, непрерывным станом, трехвалковым раскатным станом и речным станом.

1.2.2 Прошивка труб

Под прошивкой понимается процесс получения гильзы из сплошной заготовки. Гильзой называется толстостенная труба, получаемая на выходе из прошивного стана (пресса), используемая в дальнейшем для раскатки. Прошивные станы поперечно-винтовой прокатки разделяют по типу валков, на три основных вида: с бочковидными, грибовидными, дисковидными валками (рисунки 1, 2 и 3), соответственно.

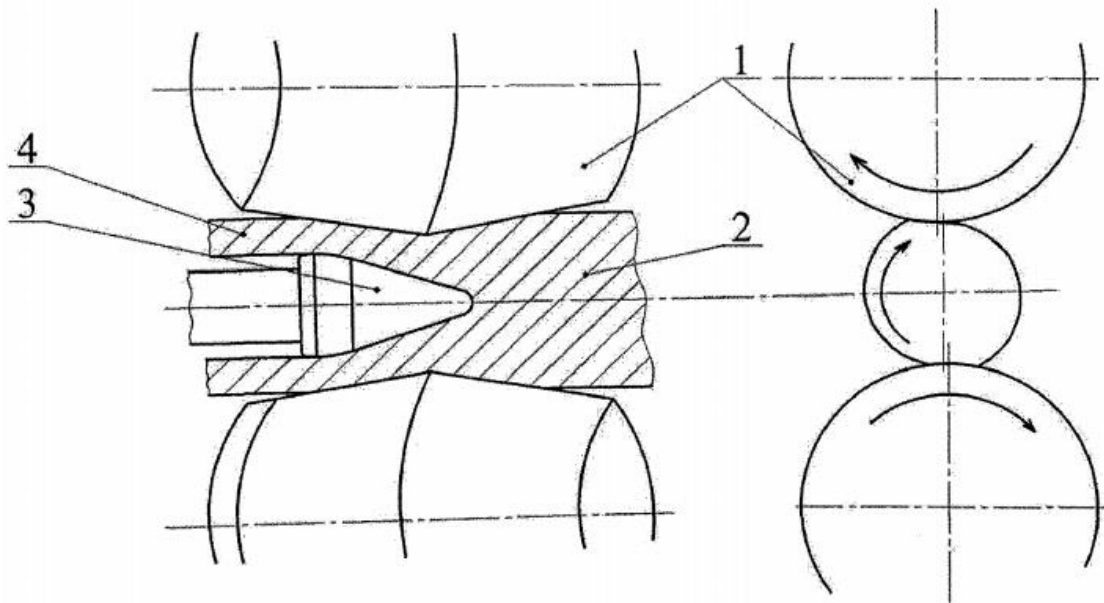


Рисунок 1 – Схема процесса прошивки в стане с бочковидными валками: 1 – валки; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – гильза

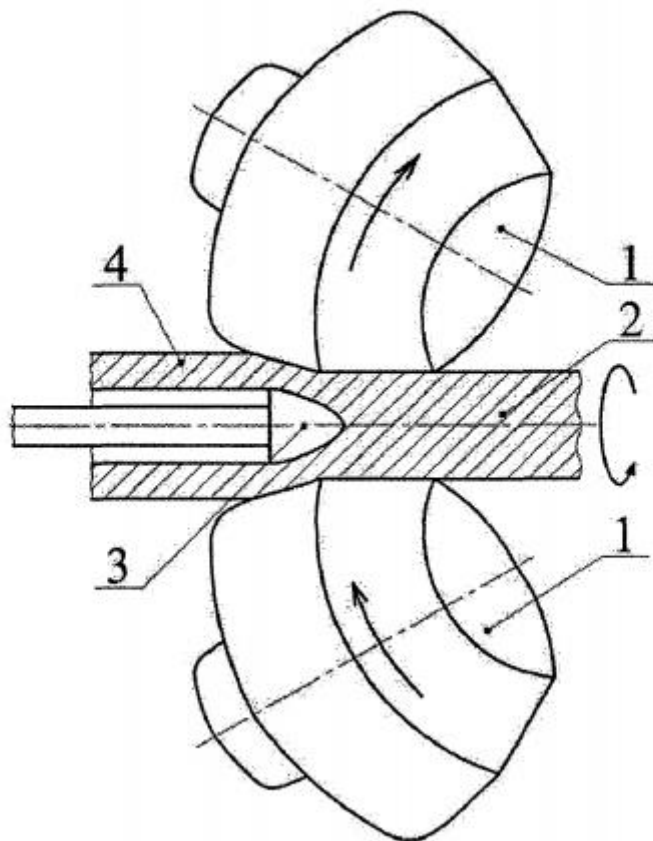


Рисунок 2 – Схема процесса прошивки в стане с грибовидными валками: 1 – валки; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – гильза

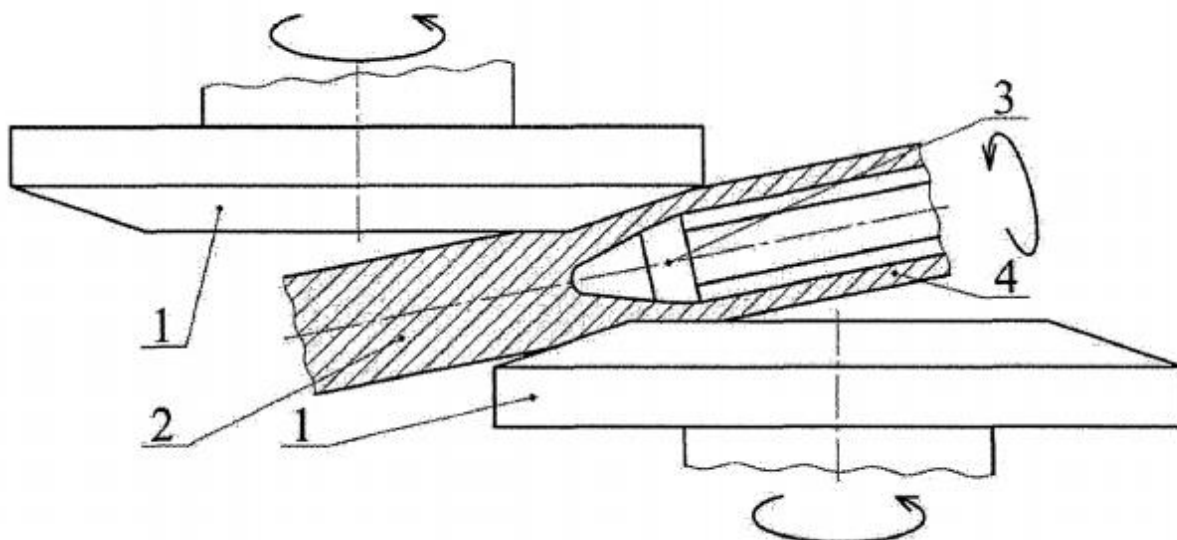


Рисунок 3 – Схема процесса прошивки в стане с дисковыми валками:
1– валки; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – гильза

Валки прошивных станов косой прокатки вращаются в одну сторону и наклонены под некоторым углом к оси прошивки. Под осью прошивки понимается линия, совпадающая с осью заготовки во время прошивки. Расположение валков под углом к оси прошивки обеспечивает спиралеобразное движение прошиваемой заготовки. Угол между осью прошивки и осью валка называют углом подачи. Валки при поперечной прокатке сближаются, обжимая заготовку, при некоторой величине обжатия в центральной части заготовки нарушается сплошность металла и происходит образование центральной полости. В первых прошивных станах, вскрытие полости происходило перед носиком оправки. При данном способе получалось большое количество внутренних дефектов. Советские ученые, предложили осуществлять прошивку при пониженных обжатиях, с выдвиганием оправки за пережим валков. Под пережимом понимается область очага деформации, расстояние между валками в которой минимально. На рисунке 4 представлено схематическое изображение очага деформации, при прошивке на прошивном стане.

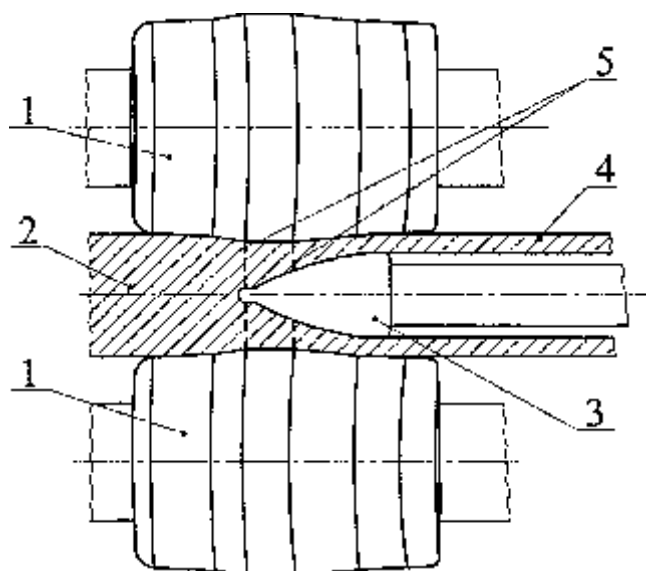


Рисунок 4 – Схема процесса прошивки с выдвинутой за пережим оправкой: 1– валки; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – гильза; 5 – воображаемые плоскости, ограничивающие пережим валков

Процесс прошивки сопровождается проскальзыванием металла относительно валков. Скольжение деформируемого металла относительно валков в осевом направлении может происходить как с опережением, так и отставанием в выходном сечении очага деформации. Скольжение деформируемого металла, относительно валков в тангенциальном направлении, всегда происходит с наличием нейтрального сечения, в котором тангенциальные скорости металла и вала равны. Скольжение гильзы относительно валков минимально в станах с грибовидными валками, вследствие особой профилировки валков их окружная скорость по длине очага деформации непрерывно увеличивается [1]. Для уменьшения осевого проскальзывания металла при прошивке в валках с бочковидными валками, на валках иногда выполняется спиральная нарезка.

Помимо двухвалковых, иногда используются трехвалковые прошивные станы. Выбор типа стана осуществляют в зависимости от качества гильзы. Четких критериев не существует, их попробовал сформулировать Г. Пфайфер:

1. По воздействию раскатного стана на разностенность гильз. Если оно носит нейтральный характер (пилигримовые и реечные станы), лучше применять двухвалковый прошивной стан, так как на нем возможно получение гильз с меньшей разностенностью. Если раскатной стан позволяет существенно снижать

разностенность гильз (стан Ассела), то можно применять трехвалковый прошивной стан.

2. По качеству заготовки. Если качество неудовлетворительное предпочтительнее – трехвалковый стан, если качество заготовки хорошее – двухвалковый.

Основные деформации при прошивке заготовки в гильзу происходят на оправке. Диаметр оправки в любом сечении в сочетании с положением валков и их размерами определяют размер раствора, от которого зависит величина обжатия, т.е. форма оправки определяет распределение обжатий в зоне деформации, а также в значительной мере стойкость инструмента. Важно чтобы оправка изнашивалась равномерно. Рабочую поверхность оправок (рисунок 5), обычно делят на четыре участка: носик оправки 1, рабочий конус 2, конус поперечной раскатки 3 и цилиндрический поясok или обратный конус 4. Носик оправки необходим для некоторого изменения течения в металле так, чтобы часть оправки, примыкающая к носику, неплотно соприкасалась с деформируемым металлом и поэтому разогревалась значительно меньше. Через слабо разогревающийся участок оправки лучше отводится тепло от носика, увеличивается его стойкость[1].

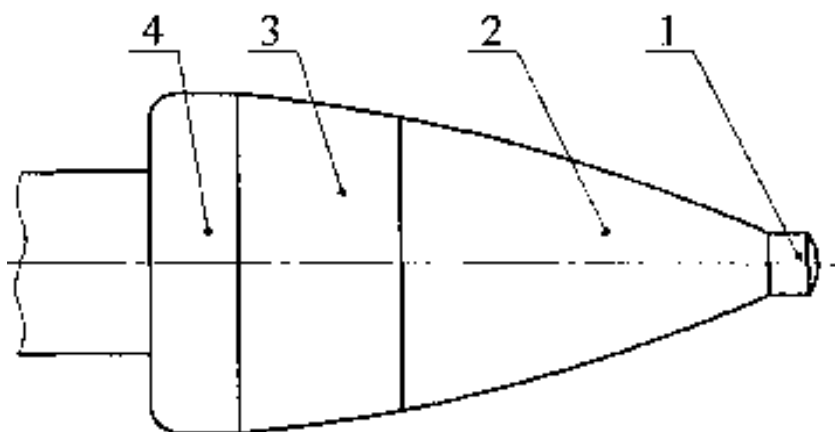


Рисунок 5 – Оправка прошивного стана с носиком: 1 – носик оправки; 2 – рабочий конус; 3 – конус поперечной раскатки; 4 – обратный конус

Рабочий конус изготавливают с очертанием в виде прямой линии (конические оправки) или дугой окружности (сферические окружности) иногда по

специальной кривой. Третий участок оправки - конус поперечной раскатки - предназначен для получения равномерной толщины стенки и иногда называется калибрующим. Желательно чтобы этот угол был равен углу выходного конуса вала, если валки установлены не с нулевым углом раскатки, то сумме угла выходного конуса вала и угла раскатки. Также иногда применяются оправки альтернативной формы, например короткие дуговые оправки (рисунок 6, а) или длинные дуговые оправки (рисунок 6, б).

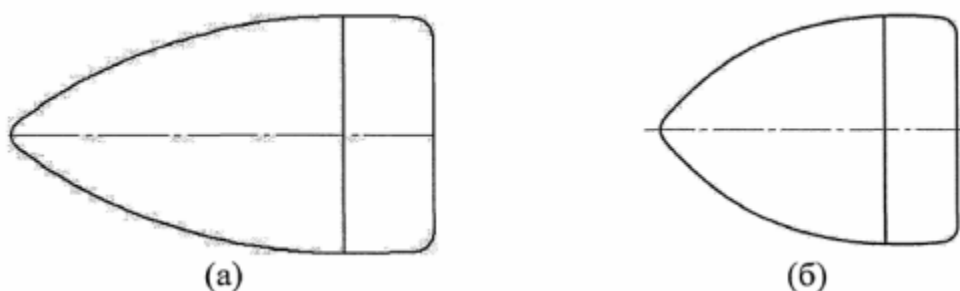


Рисунок 6 – Оправки прошивного стана: (а) – длинная дуговая оправка; (б) – короткая дуговая оправка

Оправки прошивного стана в сравнение с другим инструментом прошивки работают в самых тяжелых условиях. Оправки подвержены нагреву до высоких температур и большим давлениям. Для отвода тепла от носика оправки материал должен обладать высокой теплопроводностью. Даже при высокой прочности, но малой теплопроводности, носик оправки быстро разогревается, нарушается его форма, и оправка выходит из строя. Для изготовления оправок часто используют хромоникелевые стали.

Материал валков и дисков прошивных станков должен обладать, возможно большим коэффициентом трения, чтобы обеспечивать надежный захват заготовки и минимальное скольжение, т.к. скольжение металла в очаге деформации вызывает интенсивный износ валков или дисков. Малая величина скольжения уменьшает время прошивки и улучшает качество поверхности труб. Материал должен быть износоустойчив. Термическая обработка валков заключается в отжиге, после которого твердость поверхности бочки не должна превышать - 220 НВ [1]. Высокая твердость приводит к большей величине проскальзывания.

На прошивных станах используют дополнительный направляющий инструмент: линейки, диски (приводные, не приводные) и ролики. Направляющий инструмент поддерживает заготовку на уровне оси прошивки и ограничивает овализацию слитка и гильзы, предотвращает предварительное вскрытие полости.

С помощью направляющих линеек, можно создать наиболее закрытый калибр в прошивном стане. Направляющие линейки хорошо ограничивают деформацию металла в поперечном направлении, и используются для получения больших вытяжек при прошивке. Часто применяются для прошивных станов, работающих в линии с автомат-станами.

Линейка прошивного стана представлена на рисунке 7. На участке первой зоны деформации 1, где происходит обжатие заготовки валками без образования внутренней полости, линейки используются только как направляющий инструмент. В некоторых случаях линейки делают без этого участка, при этом необходимо удлинять вводную направляющую воронку. Гребень линейки 2 должен находиться точно на уровне пережима валков, или иногда чуть смещен в сторону входа заготовки. Гребень на линейки выполняется таким образом, чтобы его смещение относительно пережима валков соответствовало выдвигению оправки за пережим.

Металл линеек в соответствии с условиями их работы должен обладать высокой устойчивостью против истирания и иметь достаточную прочность. В качестве материала линеек часто выбирают высокохромистый чугун.

Направляющие валки (рисунок 8) изготавливают примерно такой же длины, как и рабочий валок прошивного стана, диаметром - 0,5..0,6 диаметра рабочего валка. Пережим направляющих валков обычно совпадает с пережимом опорных валков. Иногда подобно гребню на линейках, пережим на направляющих валках делается чуть в сторону входа заготовки в стан.



Рисунок 7 – Линейка прошивного стана: 1 – входная сторона; 2 – гребень; 3 – выходная сторона

Направляющие валки могут иметь форму альтернативную примеру, представленному (рисунок 8). Направляющие валки испытывают меньшие давления, чем рабочие валки, поэтому их часто изготавливают из углеродистой стали.

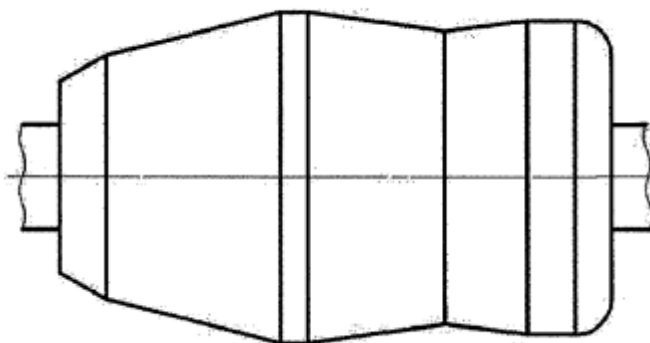


Рисунок 8 – Направляющий валок прошивного стана

Прошивка осуществляется следующим образом. В заготовках из легированных сталей просверливают отверстие (в заготовках из углеродистых сверление не выполняется) для удаления дефектов, которые обычно концентрируются в середине слитка. Заготовка нагревается в методической печи до нужной температуры, после чего доставляется с помощью транспортного оборудования (рольгангов и т.п.) к прошивному стану. Перед прошивным станом

обычно установлен пневматический зацентровщик. Зацентровщик ударом создает лунку конической формы, в торце гильзы, операция в сущности и по назначению похоже на кернение в слесарном деле. Заготовки с просверленным отверстием зацентровке не подвергаются.

В случае не качественного нагрева заготовки или длительной задержки перед станом, заготовка в стан не подается, а сбрасывается в карманы или краном убирается с рольганга. Центрованная заготовка передается выбрасывателем с рольганга на наклонную решетку, по которой она скатывается во вводной желоб прошивного стана. Заготовка задается в валки гидравлическим или пневматическим толкателем, через вводную воронку, установленную на передней стороне рабочего стола. Передвигаясь толкателем в направлении прокатки, заготовка захватывается валками. Задача должна происходить плавно, без ударов о валки стана, чтобы избежать, их механического повреждения. Валки прошивного стана вращаются в одну сторону, сообщая заготовке вращение в противоположном направлении. Одновременно заготовка получает поступательное движение вследствие наклонного расположения валков в валковых станах и смещения осей в дисковых станах. Вследствие того, что валки на входной стороне имеют конусность, заготовка, двигаясь вдоль оси прошивки, постепенно обжимается по диаметру, а поперечное сечение заготовки становится овальным. На переднем торце образуется воронкообразное углубление. Это углубление и отверстие обеспечивает направление носика оправки строго по оси заготовки, что позволяет снизить разностенность гильзы. При дальнейшем движении заготовки, носик внедряется в ее середину и осуществляется прошивка. Вследствие непрерывного сокращения расстояния между поверхностью валка и оправкой, толщина стенки гильзы постепенно уменьшается. Окончательно формирование стенки заканчивается в начале заднего конического участка оправки, образующая которого параллельна образующей выходного конуса валка.

По причине овализации сечения между оправкой и стенкой гильзы в плоскости линеек (осей опорных роликов или валков) всегда имеется зазор тем

большой, чем больше раскатка стенки. Поэтому внутренний периметр гильзы всегда больше периметра оправки и гильза легко сходит с оправки. После обжатия и выглаживания стенки, гильза сходит с оправки и округляется валками. Процесс прошивки является стационарным процессом только в средний промежуток времени [1]. В момент задачи заготовки и в момент выдачи процесс не стабильный. Часто в момент выдачи заготовки из стана уменьшается площадь контакта заготовки с валком и как следствие уменьшаются силовые параметры и, в результате усилия может не хватить для прошивки заднего конца заготовки. Для избежание этого, вальцовщики иногда поджимают валки, для увеличения обжатий, в этом случае гильзы имеют небольшую конусность.

2. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Характеристика условий эксплуатации и износа прошивных оправок

В настоящее время в промышленной эксплуатации находятся оправки со сферической, дуговой и конической рабочими поверхностями [2], охлаждаемыми как с наружной поверхности, так и непрерывно изнутри. Сейчас наибольшее распространение получили оправки со сферической рабочей поверхностью.

Оправки изготавливают различными способами в зависимости от имеющегося оборудования и технологии [3]. Одним из основных способов – литье в земляные формы с последующей полной или частичной механической обработкой, выполненные из хромоникелевой стали (20ХН4ФА, 20ХН8, 12ХНЗА и др.) [4]. Используются также заковка патрубков из специально прокатанных труб (ОАО «ПНТЗ») и точной горячей штамповки (ОАО «ДТЗ»), но более рациональным способом является изготовление механической обработкой оправок из проката [3,5,6]. Из производственного опыта известно, что наиболее эффективным материалом для изготовления оправок являются хромоникелевые сплавы. Оправки со значительным содержанием вольфрама и других легирующих элементов несмотря на высокую износостойкость быстро выходят из строя вследствие интенсивного разогрева поверхностных слоев и возникновения между наружными и внутренними слоями материала значительных термических напряжений. Известны результаты по применению высокомарганцовистых сталей для производства оправок [7], а также легирования различными элементами [8]. На прочность стали и на её износостойкость существенное влияние оказывает размер зерна стали и состояние оксидного слоя рабочей поверхности [7]. Также известны работы по исследованиям калибровки и изучению очага и режимов деформации [9,10,11,12].

Практика трубопрокатного производства и анализ литературных источников [3,6,13,14] показывают, что основными видами дефектов и износа оправок являются:

- пластическая деформация носка и рабочей поверхности (рисунок 9);
- местная выработка, истирание, задиры и вырывы металла из тела оправки (рисунок 10);
- трещины в виде сетки разгара, зональные трещины (рисунок 11);
- налипание металла заготовки на оправку.



Рисунок 9 – Деформация носка и рабочей поверхности оправки



Рисунок 10 – Местная выработка, истирания, задиры и вырывы металла из тела оправки



Рисунок 11 – Трещины на поверхности оправки

Анализируя работы, посвященные установлению теплового состояния прошивных оправок, не создается полной картины о распределении температуры

по объему водоохлаждаемых оправок. Так, в работе [18] утверждается, что в процессе прошивки поверхность оправки может разогреваться до температуры 500...700 °С. А в работе [13] предполагается, что температура поверхности на носке достигает 1200 °С. По результатам экспериментальных работ [15,17,18] известно, что водоохлаждаемая оправка нагревается не выше 900 °С. В работе [15] представлены результаты экспериментального исследования измерения температуры водоохлаждаемой оправки во время прошивки. Оправка $\varnothing 105$ мм была просверлена у носка и по рабочей части и в эти отверстия были установлены термопары на глубине 2 мм. Температурное поле стабилизировалось на пятой прошивке гильзы. При первой прошивке температура на носке составила 650 °С, при втором проходе - 850 °С (рисунок 12) и далее не увеличивалась. При наружном охлаждении измерение температуры показало, что её значение опускается до $\approx 100^\circ\text{C}$.

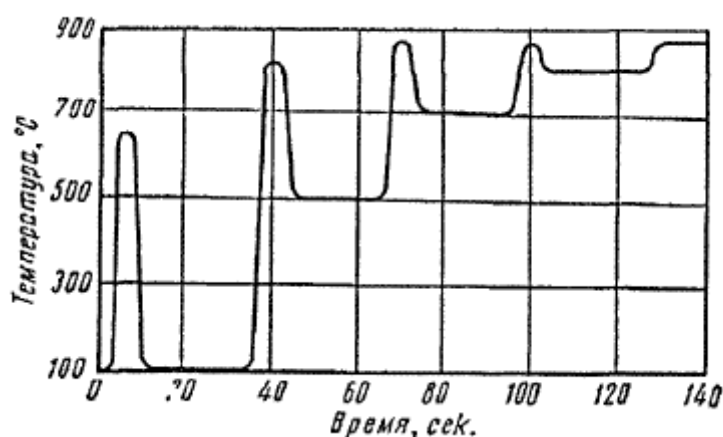


Рисунок 12 – Изменение температуры носка оправки $\varnothing 105$ мм

Степень разогрева главным образом зависит от температуры прокатываемого металла, времени прошивки, диаметра и материала оправки, условий её охлаждения между проходами и режимов самой прошивки [20].

Теоретические исследования режима работы прошивных оправок затруднены необходимостью решения дифференциального уравнения теплопроводности тела сложной формы конечных размеров, а также сложностью определения граничных условий и условий теплообмена между оправкой и

металлом, что приводит к необходимым грубым допущениям и получению приблизительных результатов [19].

Так, в работе [19] при расчете температурного поля прошивной оправки взаимодействие прошиваемого металла и инструмента рассматривается как взаимодействие тонких тел, что допустимо для оправок малых диаметров ($<\varnothing 100$ мм) при прошивке тонкостенных гильз, но приводит к большой ошибке при расчете температурного поля прошивной оправки с меньшими диаметрами.

Приведенный в работе [20] расчет разогрева дорнов при горячей пилигримовой прокатке труб не может быть использован из-за существенных различий граничных условий теплообмена между прокатываемым металлом и инструментом, а также форой дорна и оправки.

В работе [14] приведена методика расчета температурных полей сменяемых оправок, в работах [15,17] представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований температурного состояния водоохлаждаемых оправок. Таким образом, в литературных источниках не удалось обнаружить однозначной картины распределения температуры в объёме водоохлаждаемой прошивной оправки, а также ее изменение в зависимости от конструкционных, технологических параметров и при совершенствовании условий охлаждения.

2.2 Существующие способы увеличения износостойкости оправок

Местная выработка, истирание, задиры и вырывы металла из тела оправки являются характерными дефектами при прошивке заготовок из углеродистых, легированных, конструкционных и высокопрочных сталей и сплавов. Основной причиной их появления являются значительное фрикционное воздействие оправки и деформируемого металла, а также неравномерное распределение контактных напряжений по длине оправки, приводящее к появлению сосредоточенных нагрузок на рабочую поверхность. Для устранения этих дефектов используют смазки [21,22] и совершенствуют калибровку оправки. Однако, технологические смазки не нашли широкого промышленного

применения, а среди многообразия калибровок [23-25] наибольшее распространение получили оправки со сферическими и коническими рабочими поверхностями [6,11].

Пластической деформации на оправке чаще всего подвергается носок и участки, прилегающие к нему [21,24,26]. По мнению авторов работы [24] интенсивный износ оправки пластической деформацией наступает при превышении удельными усилиями на контактной поверхности сопротивления деформации материала оправки при температуре, на которую она разогревается. Известны конструктивные решения, позволяющие снизить износ оправки по этой причине и повысить срок её службы. Носок может быть изготовлен из более высокопрочного материала, чем основное тело оправки [27]. Для повышения прочности и износостойкости оправки её поверхность подвергают упрочняющей обработке, например, лазером [28] или нанесением защитного покрытия на основе тугоплавких металлов, которое играет роль теплового барьера, препятствующего разупрочнению материала оправки [29]. Основной проблемой в этом случае является разработка состава и режимов нанесения покрытия, исключающих их разрушение и отслаивание от оправки при прошивке. Наилучшие результаты достигнуты при использовании сплава ЭП-567 [30]. Предложены эффективные способы наплавки на рабочую поверхность оправки жаропрочного материала [31].

Наиболее простым способом устранения пластической деформации оправки считается подбор соответствующего материала для её изготовления, которой чаще всего осуществляется опытным путем [32]. Широко распространенным материалом для оправок является инструментальная сталь 3Х2В8. Оправки из неё используют при производстве полых заготовок из углеродистых и легированных сталей [21,22]. При получении нержавеющей гильз и труб применяют оправки из жаропрочных материалов, например, на никелевой основе [29]. Имеются сведения об использовании оправок из сплавов тугоплавких металлов: молибдена [24,23], вольфрама [33], а также псевдосплавов на никелевой основе с медью [34]. В

последнем случае медь выступает как разделитель между металлом заготовки и оправкой и обеспечивает самосмазываемость контактной поверхности.

Влияние технологических факторов процесса прошивки на стойкость оправок в технической литературе освещено недостаточно. Имеются сведения об увеличении износа с возрастанием выдвигания оправки за пережим, его уменьшении при использовании более высоких углов подачи и частоты вращения валков. Известно, что установка оправки не в пережиме валков, а в конусе прошивки, уменьшает её износ.

Трещины в виде сетки разгара и зональные трещины образуются на оправке из-за термических напряжений циклического характера, появляющихся при нагреве во время прошивки и охлаждения в паузах между проходами. С целью предотвращения их появления рекомендуют использовать для изготовления оправок материалы с повышенной теплопроводностью, теплостойкостью, а также совершенствовать режимы охлаждения оправок, снижая величину термических ударов [35]. Оплавление рабочей поверхности оправки наблюдается в основном при прошивке заготовок из тугоплавких металлов [22].

Налипание металла гильзы на оправку характерно для процессов прошивки заготовок из нержавеющей стали, а также тугоплавких металлов. Для исключения налипания используют стеклосмазки, защитные покрытия оправок [21,29,33,36].

Большинство исследователей считают, что решающее влияние на стойкость оправок оказывают уровень удельных усилий на контактной поверхности, а также температурные условия их работы, которые влияют на прочность материала оправки.

Влияние технологических факторов процесса прошивки на стойкость оправок в технической литературе освещено недостаточно. Имеются данные [37], что установка оправки не в пережиме валков, а в конусе прошивки, уменьшает её износ. При увеличении углов подачи стойкость оправок возрастает несмотря на рост осевого усилия на упорный стержень [23].

Таким образом, в результате анализа научно-технической литературы установлено, что оценка теплового состояния тел сложной формы (прошивных водоохлаждаемых оправок) может производиться численными методами конечных элементов, а среди существующих способов увеличения их износостойкости наиболее эффективными являются:

1. Подбор материалов;
2. Наплавка рабочей поверхности;
3. Использование составного инструмента;
4. Совершенствование системы внутреннего охлаждения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО СТАНА

3.1 Постановка задач физического моделирования

В связи с недостаточным количеством информации о скорости нагрева, охлаждения, количества проходов, необходимого для выхода оправка в стационарное термическое состояние, было принято решение провести физическое моделирование процесса нагрева оправки, имитируя её нагрев от контакта с заготовкой.

Рассматривая возможные варианты геометрии и устройства оправок было выделено три типовые конструкции:

- 1) Оправка без наличия водяного охлаждения;
- 2) Оправка с наличием водяного охлаждения;
- 3) Составная оправка, имеющая винтовое или сварное соединение наконечника оправки, изготовленного из более тугоплавких и износостойких материалов.

3.2 Оборудование для физического моделирования

Лабораторные исследования проводились с использованием лабораторной камерной нагревательной печи ПКЛ-1,2-36(рисунок 13).

В электропечах типа ПКЛ для нагрева образцов предназначена рабочая камера, образованная теплоизоляционными материалами. Хорошая теплоизоляция нагревательной камеры снижает потери тепла и делает печь достаточно экономичной.

Нагрев производится с помощью проволочных нагревателей, расположенных вдоль стенок внутри рабочей камеры и на поду печи. Подовые нагреватели закрыты огнеупорными пластинами.

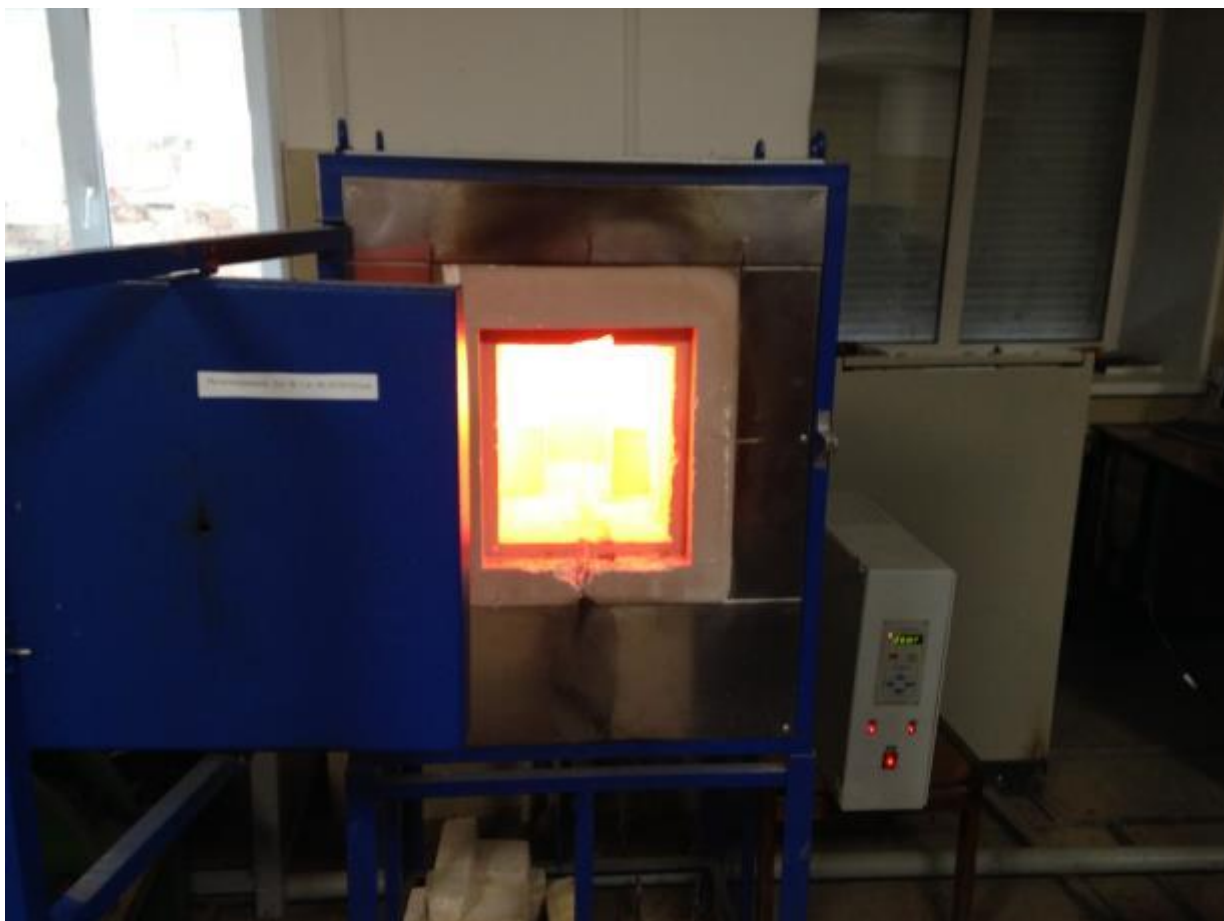


Рисунок 13 – Лабораторная камерная нагревательная печь ПКЛ-1,2-36

Рабочая камера всех электропечей закрывается дверью, футерованной огнеупорными материалами. Дверь открывается влево так, чтобы внутренняя разогретая футеровка двери при её открывании всегда была направлена в сторону печи, что более удобно и безопасно для персонала. Силовое и регулирующее оборудование смонтировано в отдельном блоке управления.

Печь имеет высококачественную теплоизоляцию, обеспечивающую низкую температуру наружных стенок печи, и оснащена электронными термоконтроллерами для управления нагревом с цифровой индикацией температуры. С целью повышения безопасности работы электропечь оснащена блокировочными выключателями для снятия напряжения (отключения нагрева) при открывании двери. При обрыве термопары и превышении температуры срабатывает защита, отключающая напряжение питания нагревателей печи.

Технические характеристики печи приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики нагревательной лабораторной печи ПКЛ-1,2-36

Тип	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	Рабочее пространство, мм	Габаритные размеры, мм	Мощность/напряжение, кВт/В	Масса печи, кг
ПКЛ-1,2-36	1200	300×300×400	880×1340×780	5,7/380	105

Для определения температуры использовался инфракрасный пирометр Кельвин ПЛЦ-1300 (рисунок 14).

Инфракрасный пирометр предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности. Применяется для контроля теплового режима оборудования, а также для измерения температуры в технологических процессах металлургии, машиностроения, нефтехимии и т.д.

Приемник Кельвин преобразует энергию инфракрасного излучения, излучаемую поверхностью объекта, в электрический сигнал. Затем эта информация преобразуется в температурные данные. В Кельвине предусмотрена автоматическая компенсация температуры окружающей среды. Цифровая установка излучательной способности объектов (ε) по справочной таблице (см. Таблицу 3) обеспечивает необходимую точность измерений.



Рисунок 14 – Бесконтактный инфракрасный пирометр ПЛЦ-1300

Технические характеристики инфракрасного пирометра приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики инфракрасного бесконтактного пирометра Кельвин ПЛЦ – 1300

Диапазон измеряемых температур	+200°C ... + 1300°C
Предел допускаемой относительной погрешности	±1%
Разрешение по температуре	1°C
Диапазон температур окружающей среды при эксплуатации	-20°C ... + 50°C
Диапазон установки излучательной способности объекта	0,01...0,1
Показатель визирования	1:300
Габаритные размеры, мм	230x67x210
Масса прибора, кг	0,7
Корпус	IP 20
Цифровой выход	RS 232

Излучательной способностью объекта называется отношение мощности излучения объекта при данной температуре к мощности излучения абсолютно черного тела (АЧТ). АЧТ определяется как поверхность, излучающая максимальное количество энергии при данной температуре. Излучательная способность АЧТ равна 1,00. Излучательные свойства объекта определяются свойствами материала и чистотой обработки поверхности объекта, а не цветом его поверхности. В Таблице 3 приведены типичные значения излучательной способности некоторых широкораспространенных материалов относительно абсолютно черного тела.

Таблица 3 – Излучательная способность материалов

Материал	Излучательная способность (ϵ)
Алюминий	0,2...0,3
Медь	0,6...0,8
Сталь	0,56...0,8
Чугун	0,54...0,78
Асфальт, гравий, керамика, дерево, окалина	0,95

В связи с тем, что оправка прошивного стана покрыта тонким слоем окалины, показатель излучательной способности при измерении был принят равным 0,95.

Так как использование водяного охлаждения невозможно в условиях эксперимента, было принято решение провести испытания неводоохлаждаемой оправки. В качестве испытуемой была использована реальная оправка прошивного стана ТПА-140 (рисунок 15). Замеры температуры осуществлялись в области между точками 1 и 2, так как согласно работе [38] основная нагрузка во время процесса прошивки прилагается к этой области.

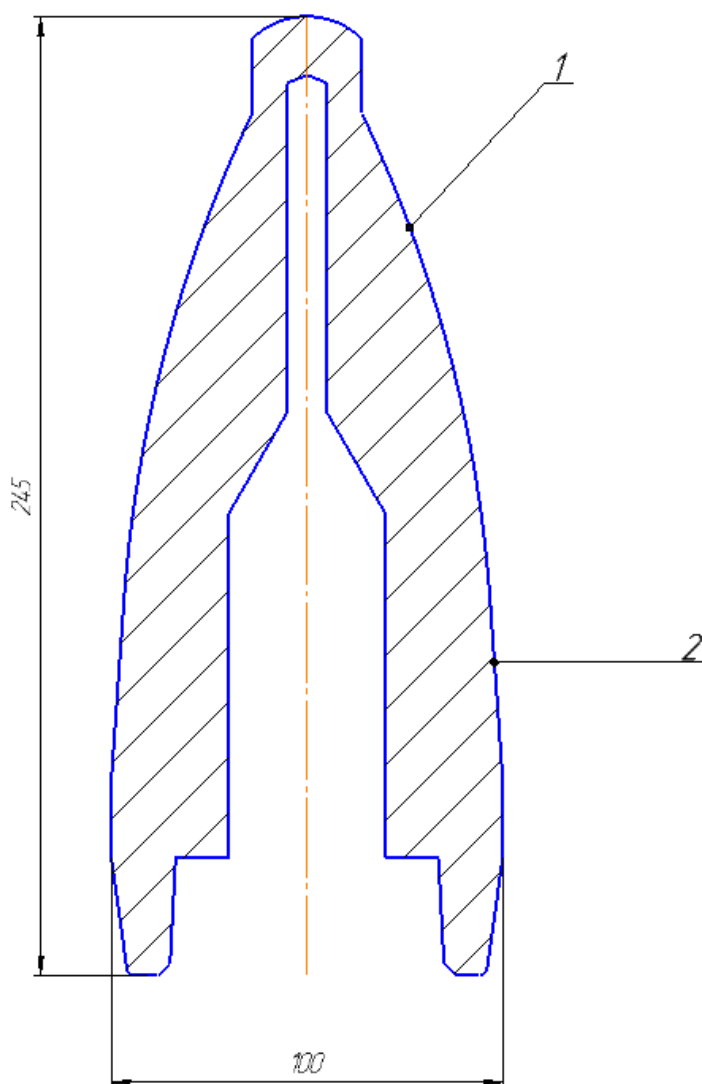


Рисунок 15 – Эскиз оправки прошивного стана ПАО «ТагМЕТ»

3.3 План проведения эксперимента

3.3.1 Расчет времени нагрева оправки в печи

При определении времени нагрева нужно определить, необходимо ли учитывать перепад температуры по сечению изделия, т.е. является изделие «тонким» или «массивным». Для этого рассчитывается критерий Био.

За условную границу между «тонкими» и «массивными» изделиями принимают такое сечение, для которого число Био равно 0.25. Если $Bi < 0.25$ расчеты выполняются по формулам для тонких изделий, если $Bi > 0.25$ - по методике, принятой для массивных изделий.

$$Bi = \frac{\alpha \times S}{\lambda}, \quad (1)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}}$;

λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$;

S – характерный геометрический размер изделия, мм.

В соответствии с работой [13] температура нагрева носка оправки во время первого прохода достигает 650°C , в связи с этим принимаем $t_{\text{нагр}} = 650^\circ\text{C}$.

Температура в печном пространстве должна быть выше, чтобы обеспечить такой нагрев, поэтому принимаем $t_{\text{печи}} = 1000^\circ\text{C}$.

Учитывая сложность теплового процесса на поверхности нагреваемого изделия, коэффициент теплоотдачи считают сложной величиной, которая равна сумме коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией.

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}} \quad (2)$$

Для электрических печей с температурой выше 700°C коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ приближенно может быть принят $10 \dots 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Вычислим коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием:

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{мн}}}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{мк}}}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(T_{\text{п}} - T_{\text{мн}}) \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{мк}})}}, \quad (3)$$

где $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$;

$T_{п}$ – Температура в печном пространстве, К;

$T_{мн}$ – Начальная температура металла, К;

$T_{мк}$ – Конечная температура металла, К.

$$C_{пр} = \frac{C_0}{\frac{1}{\epsilon_M} + \frac{F_M}{F_{п}} \left(\frac{1}{\epsilon_{п}} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$;

ϵ_M – степень черноты нагреваемого металла;

F_M – тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, $м^2$;

$F_{п}$ – поверхность нагревательной камеры печи, $м^2$;

$\epsilon_{п}$ – степень черноты кладки печи.

Для определения тепловоспринимающей поверхности нагреваемого металла использовали 3D модель оправки, созданную в программе Компас-3D V16.

Согласно полученным данным $F_M = 0.059146 м^2$ (рисунок 16).

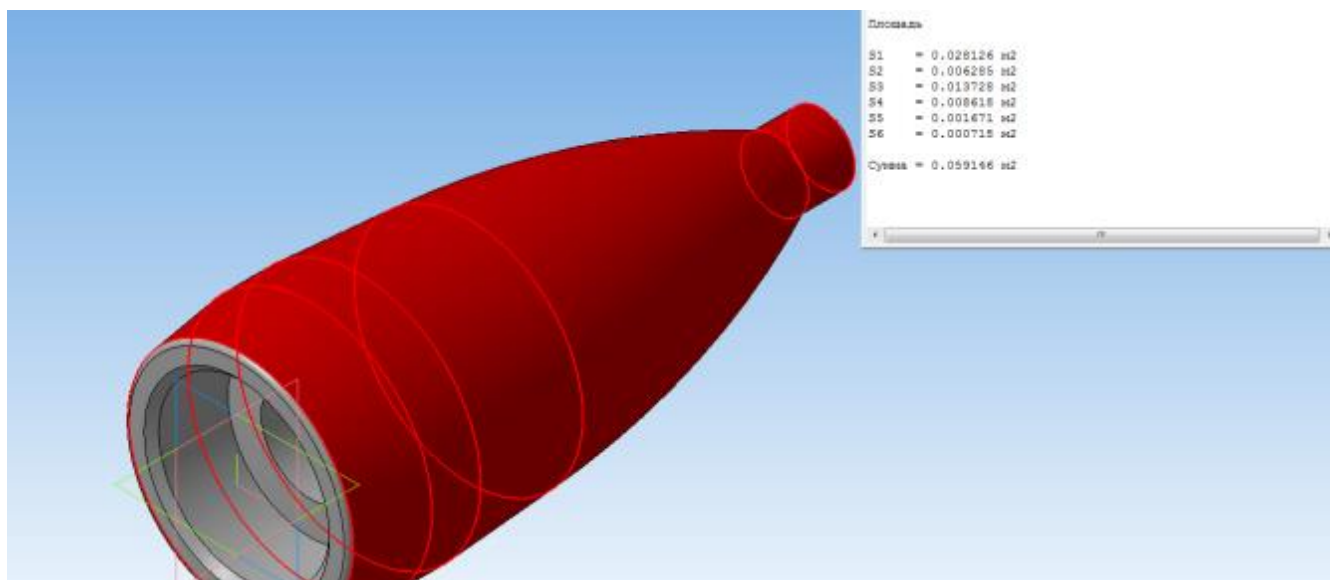


Рисунок 16 – Площадь контактной тепловоспринимающей поверхности оправки, рассчитанная программой Компас-3DV16

Площадь поверхности нагревательной камеры, согласно приведенным выше данным (см. таблицу 1) равна $0,45 м^2$.

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,95} + \frac{0,06}{0,45} \cdot \left(\frac{1}{0,95} - 1\right)} = 5,35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Тогда

$$\alpha_{\text{л}} = 5,35 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \left(\frac{923}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1273 - 293) \cdot (1273 - 923)}} = 203,78, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\text{Принимаем } \alpha_{\text{к}} = 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\alpha = 203,78 + 15 = 218,78 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$Bi = \frac{218,78 \cdot 0,0275}{28,1} = 0,2146$$

Критерий Био $Bi < 0.25$, а значит изделие малогабаритное и перепад температуры по сечению незначителен и им можно пренебречь, поэтому при расчете времени нагрева и выдержки изделия целесообразнее пользоваться понятием теплотехнически «тонкое» изделие, а равно производить расчет по формулам для теплотехнически «тонких» изделий

Для определения времени нагрева оправки использовался закон Стефана-Больцмана, согласно которому:

$$\tau = \frac{G \cdot c}{C_{\text{пр}} \cdot F} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^3} \cdot \left[\psi \left(\frac{T_{\text{МК}}}{T_{\text{п}}}\right) - \psi \left(\frac{T_{\text{МН}}}{T_{\text{п}}}\right) \right], \quad (5)$$

где G – масса садки, кг;

c – удельная теплоемкость загрузки, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$;

F – тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, м^2 ;

$T_{\text{п}}$ – Температура в печном пространстве, К;

$T_{\text{МН}}$ – Начальная температура металла, К;

$T_{\text{МК}}$ – Конечная температура металла, К;

ψ – функция отношения температуры загрузки к температуре печи (рисунок 17).

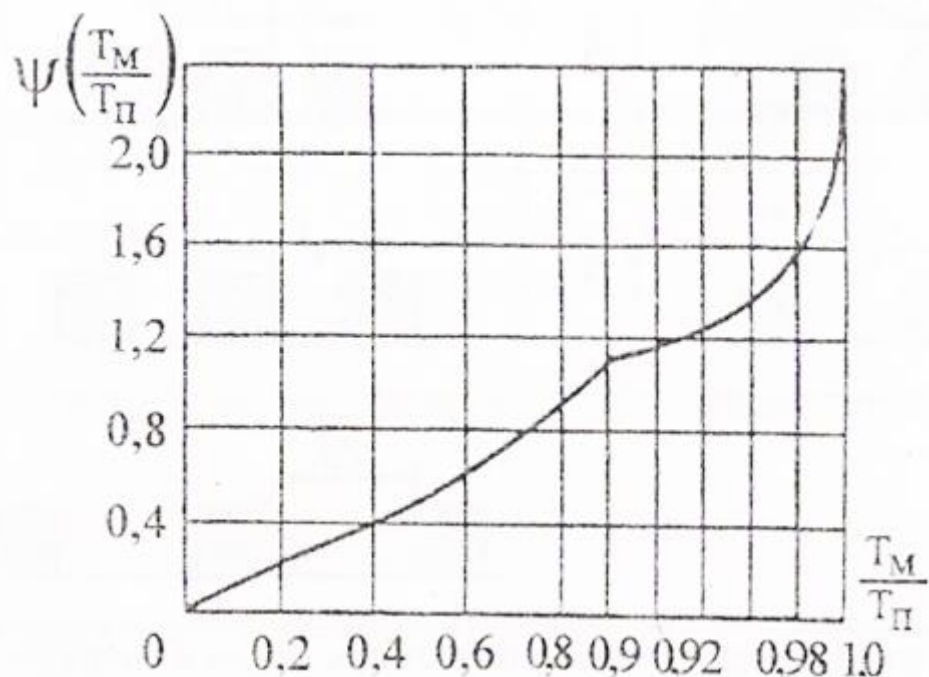


Рисунок 17 – Зависимость $\psi\left(\frac{T_M}{T_\Pi}\right)$ от $\left(\frac{T_M}{T_\Pi}\right)$

Массу садки вычислим по формуле:

$$G = \gamma \cdot V, \quad (6)$$

где γ – плотность металла при 20 °С, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V – объем, занимаемый заготовкой, м^3 .

Для определения объема, занимаемого заготовкой, использовали 3D модель оправки, созданную в программе Компас-3D V16, согласно которой $V = 0.000983 \text{ м}^3$.

Тогда $G = 7800 \times 0.000983 = 7,6674 \text{ кг}$.

$$\tau = \frac{7,6674 \cdot 586,5}{5,35 \cdot 0,111} \cdot \frac{100}{\left(\frac{1273}{100}\right)^3} \cdot [0,8 - 0,3] = 183,53 \text{ с} = 3,05 \text{ мин}$$

Согласно полученным данным время, необходимое для имитации нагрева от контакта оправки с заготовкой во время одного прохода, равняется 3 минуты и 3 секунды.

3.3.2 Определение количества проходов, необходимого для выхода оправки в стационарный температурный режим

Во время работы оправки прошивного стана, температурный режим оправки стабилизируется после определенного количества проходов, во многом это зависит от марки стали, конструкции оправки, а также от характеристик процесса прошивки.

Для определения количества проходов, необходимого для выхода оправки в стационарный режим, имитировалось нагревание оправки от контакта с заготовкой путем её установки в нагревательную лабораторную печь на рассчитанное время.

По прошествии необходимого времени, оправка захватывалась щипцами и находилась на открытом воздухе 6 секунд (рисунок 21), имитируя охлаждение оправки во время пауз. Температура рабочей поверхности фиксировалась каждый раз, когда заготовка доставалась из печи. Полученные данные приведены в таблице 4, а также на рисунках 18, 19, 20.

Таблица 4 – Результаты измерений температуры

№ Прохода	Температура рабочей области на выходе из печи, °С	Время в печи, с	Время охлаждения, секунд, с	Температура рабочей области после охлаждения, °С
1	212	183	6	200
2	400	185	7	318
3	456	183	6	430
4	620	184	6	570
5	714	184	6	620
6	718	183	6	700
7	750	205	7	702
8	762	183	8	704
9	800	183	6	704
10	780	184	6	730
11	770	190	8	717

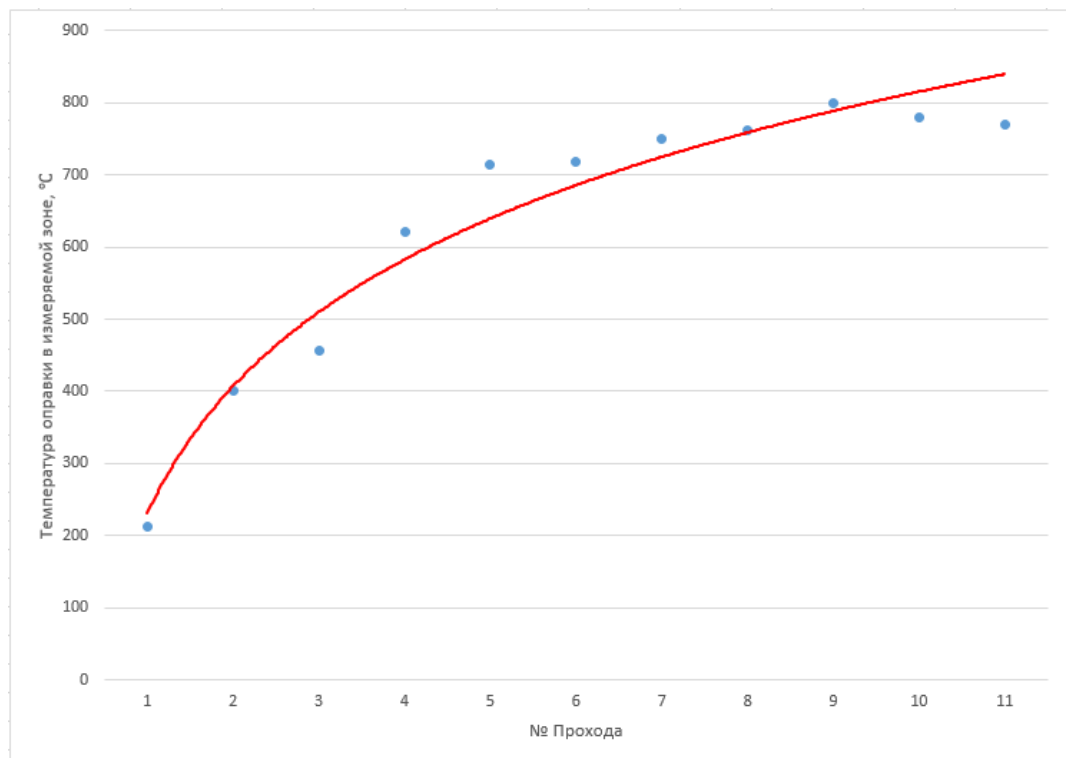


Рисунок 18 – Полученный график зависимости температуры оправки от количества имитируемых проходов после выноса из печи

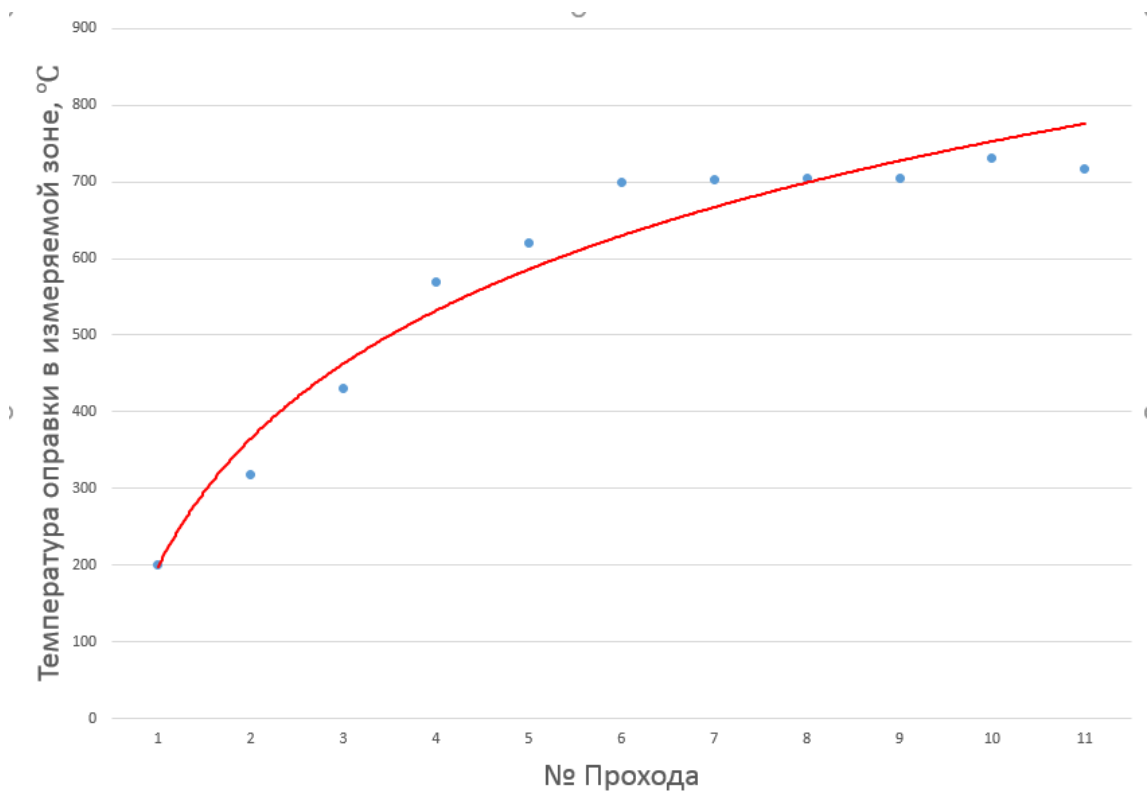


Рисунок 19 – Полученный график зависимости температуры оправки от количества имитируемых проходов после охлаждения

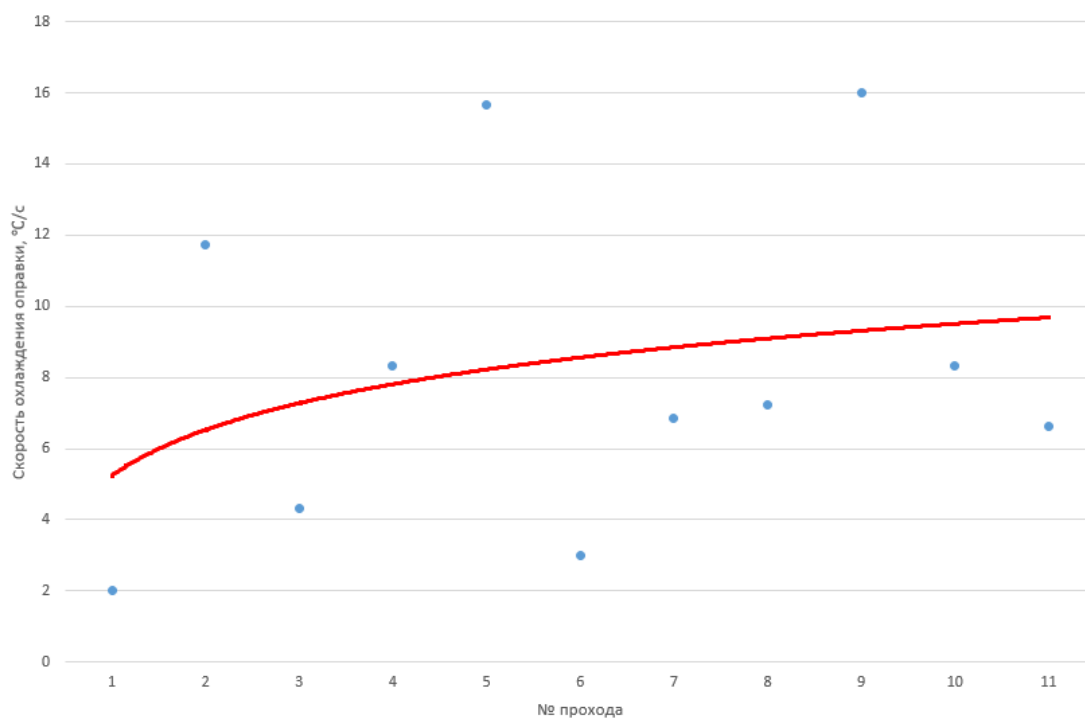


Рисунок 20 – Полученный график зависимости скорости охлаждения оправки от номера имитируемого прохода



Рисунок 21 – Нагретая оправка во время процесса охлаждения

3.4 Анализ полученных данных

Согласно полученным данным выход оправки в стационарный температурный режим наступил после 6 имитационного прохода. Однако, анализируя работу [14], а также статью [39] было принято решение не проводить компьютерное моделирование оправок без водяного охлаждения, в связи с тем, что температура во время процесса нагрева и охлаждения значительно превышает показатели схожих оправок с наличием водяного охлаждения.

4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУХВАЛКОВОЙ ПРОШИВКИ

4.1 Задачи компьютерного моделирования

Современные непрерывные трубопрокатные станы представляют собой сложные, дорогостоящие электромеханические системы.

Поэтому с целью каких-либо исследований, либо модернизации технологии, целесообразно выполнить исследования процессов, протекающих при двухвалковой прошивке, с помощью компьютерного моделирования.

С целью исследования температурного поля оправки, а также определения значения износа от нормальных и касательных напряжений поставлены следующие задачи:

- сравнить данные полученные при экспериментальном исследовании при прошивке с использованием оправки с водяным охлаждением с данными физического моделирования;
- определить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на процесс износа оправки прошивного стана;
- выявление оптимальных технологических параметров оправки прошивного стана, а также геометрии оправки.

4.2 Выбор параметров оправок для проведения компьютерного моделирования

Согласно исследованию [40] температура заготовки при прошивке напрямую влияет на стойкость оправок, так при более интенсивном разогреве поверхности оправок уменьшается прочность поверхностных слоев, что, соответственно, приводит к более интенсивному износу. На рисунке 22 представлены значения распределения предела текучести стали марки 35ХН2Ф при повышенных температурах [41].

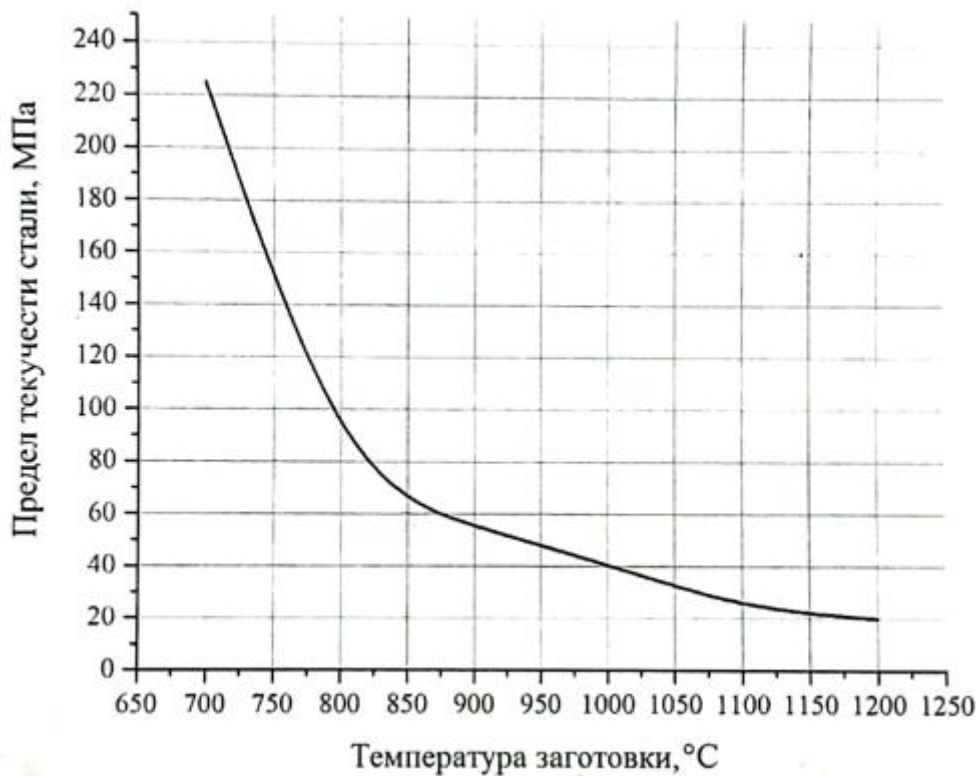


Рисунок 22 – Распределение предела текучести стали марки 35ХН2Ф

Также немаловажным параметром, влияющим на стойкость оправки, являются температуры начала формирования аустенита (A_{c1}) и конца превращения феррита в аустенит (A_{c3}). Известно, что при поверхностной закалке по сечению детали получаются три характерные зоны с разной структурой и свойствами (рисунок 23) [42].



Рисунок 23– Распределение зон с различными свойствами по сечению образца

В первой зоне – получается максимальная твердость. Во второй зоне – твердость будет ниже. В третьей зоне – нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры, остается исходный перлит и феррит, твердость низкая, но достаточно высокие пластические свойства.

Для проведения компьютерного моделирования были выбраны две оправки из различных марок сталей, испытываемых в одних условиях. Сводная таблица значений критических точек для выбранных марок сталей представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Сводная таблица значений критических точек

Марка стали	$A_{c1}, ^\circ\text{C}$	$A_{c3}, ^\circ\text{C}$
4Х4ВМФС	830	910
20ХН4ФА	710	750

Анализируя рисунок 23 и таблицу 8 можно сделать вывод о том, что наибольшая глубина с максимальной твердостью будет образовываться у оправок, изготовленных из стали марки 20ХН4ФА. Наименьшая глубина с максимальной твердостью будет образовываться у оправок, изготовленных из стали марки 4Х4ВМФС.

Для оценки полученных данных было проведено компьютерное моделирование процесса прошивки с использованием оправки из различных материалов.

4.3 Сравнительный анализ существующих способов исследования температурных полей технологического инструмента

При решении уравнений теплопроводности применяются методы математической физики: метод разделения переменных (метод Фурье); метод функций источников (функций Грина); метод тепловых потенциалов; метод интегральных преобразований [43,44].

Наиболее распространенным является метод Фурье. Сущность метода заключается в том, что решение отыскивается в виде частных решений,

удовлетворяющих однородным граничным условиям. Частное решение представляется в виде произведений функций, одна из которых зависит только от времени, а другая - от пространственных координат. Недостатками этого метода являются: невозможность его непосредственного применения в случае неоднородных граничных условий [45], которые вначале должны быть приведены к однородным; невозможность его применения для полуограниченных и неограниченных тел; значительные трудности, связанные с решением краевых задач при граничных условиях четвертого рода; сложность решений для начальной стадии нагрева тел.

Метод функций источников позволяет решать краевые задачи при неоднородных краевых условиях, как для конечных, так и для бесконечных тел. Физическая сущность метода состоит в представлении процесса распространения тепла как совокупность процессов выравнивания температур, вызываемая действием множества элементарных источников тепла, распространенных в пространстве и во времени. К недостатку метода относится то, что построение функции Грина требует определенной изобретательности и трудновыполнимо.

Метод тепловых потенциалов позволяет сводить решение дифференциального уравнения параболического типа к интегральному уравнению, которое более удобно для проведения числовых расчетов. Недостаток метода - громоздкость, сложность, а также невозможность его непосредственного применения в случае неоднородных начальных условий.

Недостатки классических методов решения краевых задач, рассмотренных выше, привели к разработке новых методов - к интегральным преобразованиям. Одним из наиболее распространенных методов интегральных преобразований является метод Лапласа [46]. Сущность этого метода состоит в том, что изучается не сама функция, а ее видоизменение (изображение). Метод позволяет легко решать задачи с простыми начальными условиями для неограниченных или полуограниченных тел. Однако при применении этого метода возникают значительные трудности при решении многомерных задач, начальные условия

которых заданы в виде функции пространственных координат. Разработанные методы интегральных преобразований по пространственным координатам (синус-, косинус- преобразования Фурье) расширяет область применения данного метода. Синус-, косинус- преобразования применяются при граничных условиях первого и второго родов соответственно. Если же ядро преобразования - функция Бесселя, то получаем преобразование Ханкеля [47]. Преобразование Ханкеля применяется для тел, имеющих осевую симметрию.

Ограниченность методов интегральных преобразований Фурье, Ханкеля и отчасти Лапласа и острая необходимость в решении задач с конечной областью изменения переменных привели к созданию методов конечных интегральных преобразований. Сущность метода конечных интегральных преобразований Грина состоит в выборе ядра интегрального преобразования в соответствии с дифференциальным уравнением и граничными условиями, т.е. ядром преобразования служит функция Грина для данной задачи. После решения задачи в изображениях, обратное преобразование выполняется по соответствующим формулам обращения [48]. Принципиальные недостатки указанных методов заключаются в трудностях, возникающих при прямых преобразованиях и обратных переходах.

Как видим, решение дифференциального уравнения с общими краевыми условиями аналитическими методами сложно, а для задач циклического теплообмена наталкивается на определенные трудности. Например, в работе [49] рассчитан тепловой режим водоохлаждаемой оправки с использованием аналитического метода. Так как найти решение в точной постановке с учетом геометрии не представляется возможным, то использовались упрощения и распределение температуры рассчитывалось в бесконечном полом цилиндре в результате чего было только получено общее представление о увеличении и снижении температуры в определенных точках.

В последнее время наиболее распространенным стал численный метод решения уравнений теплопроводности. Численный метод позволяет решать

задачи с учетом физических свойств тела и выделяемого дополнительного источника тепла - теплоты трения и пластической деформации [28] и обеспечивает более простой переход от условий задачи в виде систем уравнений к конкретным числовым ответам, минуя получение общего решения задачи. Поэтому при решении тепловой задачи процесса горячей прокатки труб этот метод является наиболее приемлемым.

Сущность этого метода заключается в том, что область задания дифференциальных уравнений заменяется некоторой дискретной областью, состоящей из множества точек (узлов), называемой сеткой, вместо функции непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определенные в узлах сетки. Для этого дифференциальные уравнения и краевые условия заменяются (аппроксимируются) системой алгебраических уравнений при помощи соответствующих разностных отношений, решение которых сводится к выполнению простых алгебраических операций. Расчетные соотношения приводятся к виду, где будущая температура в рассматриваемой узловой точке является функцией времени и постоянных температур рассматриваемой и соседних точек. Такие уравнения составляются для всех узловых точек рассматриваемой области, включая и граничные. В результате получаем замкнутую систему алгебраических уравнений.

Ввиду однотипности вычислений при решении такой системы представляется широкая возможность для использования современной вычислительной техники.

Чаще всего, в современных расчетах, используются такие численные методы как: метод конечных разностей (МКР) [49], метод конечных элементов (МКЭ) [50], а также метод граничных элементов (МГЭ) [51]. Наиболее простым и достаточно точным из численных методов является МКР, но в то же время область его применения ограничена формой рассматриваемого образца. Достаточную точность можно получить только на фигурах простой формы или фигурах, которые могут быть на них разложены. Применение же метода

конечных элементов не ограничено ни формой, ни условиями контакта или взаимодействия. Основными его недостатками являются относительная сложность и трудоемкость расчетов, но современные программные средства, такие как Flow Works, Qform, Ansys, Forming, Algor, Nastran и тд, сделали этот метод наиболее популярным и доступным в инженерных расчетах. Поэтому в работе для проведения компьютерного моделирования было использовано лицензионное программное обеспечение «QForm 3D», реализующее алгоритм на основе метода конечных элементов.

4.4 Компьютерное моделирование процесса двухвалковой прошивки

Для оценки эффективности работы оправок из стали 20ХН4ФАи 4ХВМФС было проведено компьютерное моделирование процесса прошивки. Исходные данные для проведения моделирования приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Исходные данные процесса прошивки

Радиус заготовки, мм	Радиус гильзы, мм	Толщина стенки и гильзы, мм	Радиус валка в их пережиме, мм	Угол валка в конусе прошивки, град	Угол валка в конусе раскатки, град	Расстояние между валками в их пережиме, мм	Длина рабочей поверхности оправки, мм	Угол на выходном участке гребня и линейки, град	Радиус оправки, мм
200	216,5	27	650	18	12	176	181	650	180

В процессе моделирования двухвалковой прошивки оценивался износ инструмента от нормальных (pressure) и касательных (traction) напряжений, а также температура оправки.

Износ инструмента рассчитывался по следующим формулам:

$$W_p = \int_0^t \frac{K_p \times p \times V_t}{\sigma} dt; \quad (7)$$

$$W_t = \int_0^t \frac{K_t \times \tau \times V_t}{\sigma} dt; \quad (8)$$

где: W_p и W_t – износ инструмента от нормальных давлений (pressure) и от касательных напряжений (traction);

K_p и K_τ – эмпирические коэффициенты wear_pressure_coefficient и wear_traction_coefficient в интерфейсе QForm;

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

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

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

σ – предел текучести материала инструмента, МПа;

t – время контакта заготовки с инструментом, сек.

В модели были приняты следующие допущения:

- коэффициент трения между валками и заготовкой: 0,3 по закону Зибеля;
- коэффициент трения между оправкой и заготовкой: 0,3 по закону Зибеля;
- коэффициент трения между направляющими линейками и заготовкой: 0,3 по закону Зибеля;
- начальная температура заготовки: 1200°C.

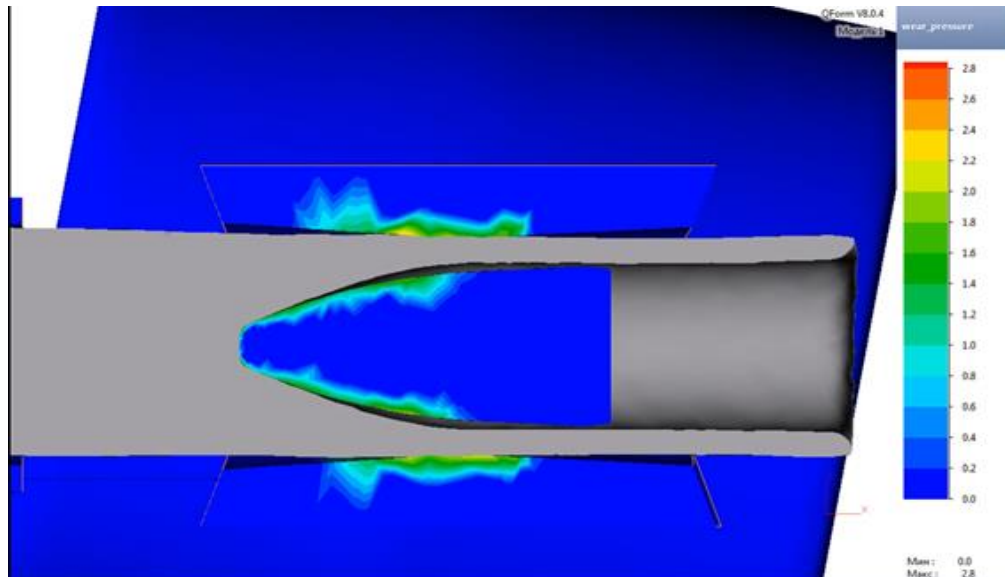


Рисунок 24 – Моделирование нормального износа во время двухвалковой прошивки с оправкой из стали 4ХВМФС

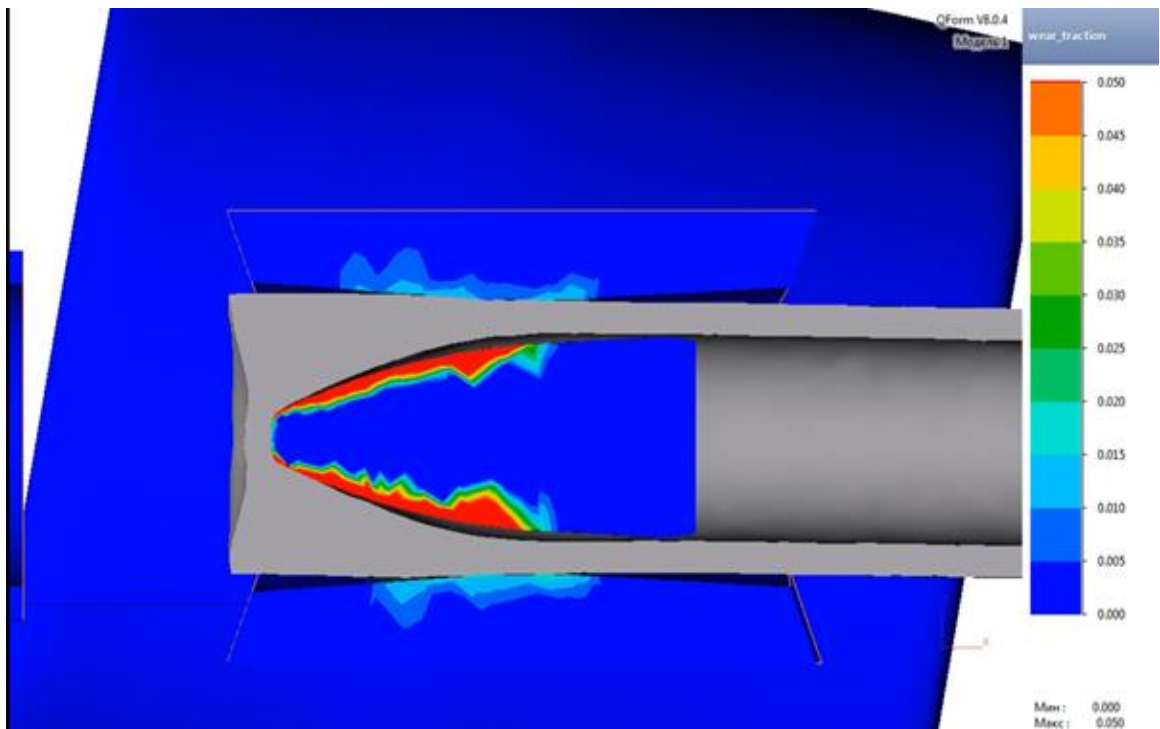


Рисунок 25 – Моделирование касательного износа во время двухвалковой прошивки с оправкой из стали 4ХВМФС

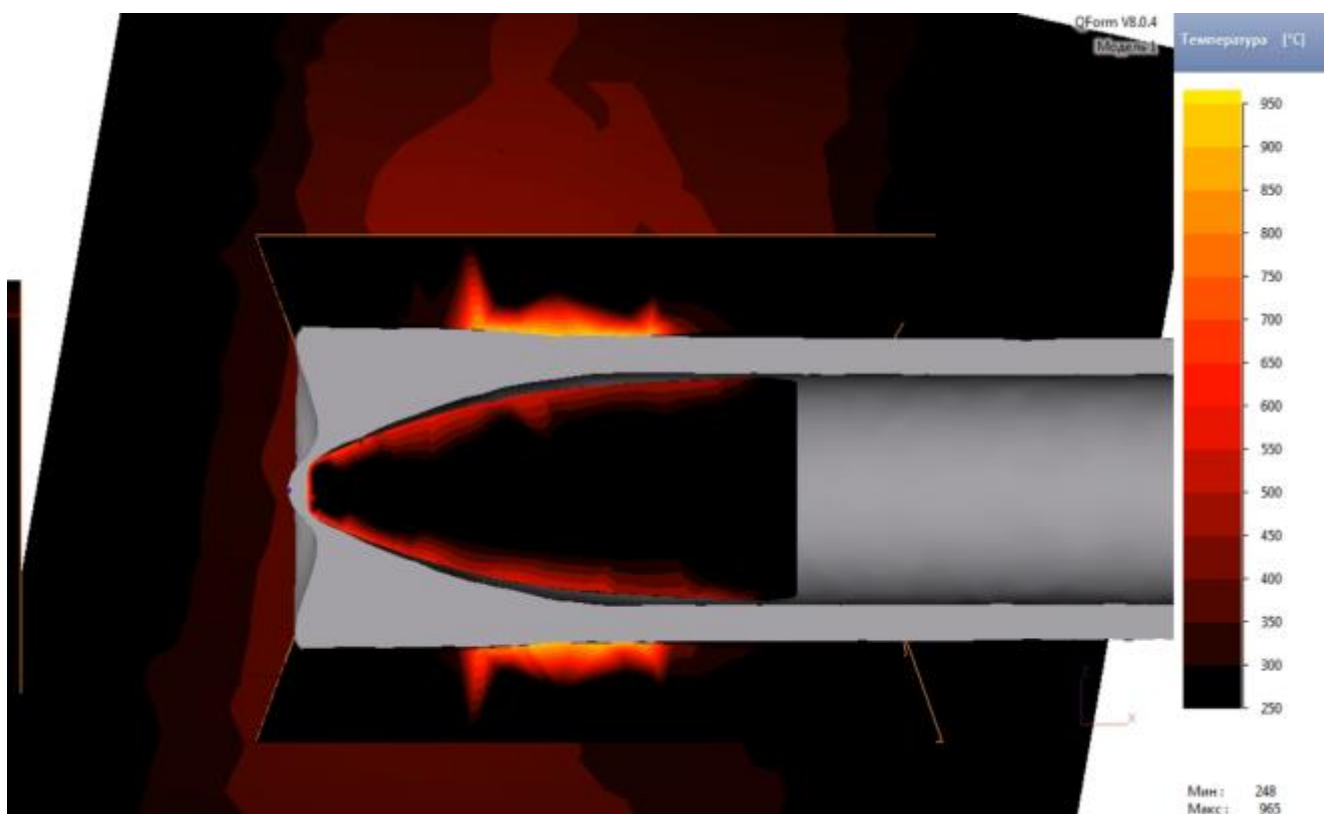


Рисунок 26 – Моделирование нагрева во время двухвалковой прошивки с оправкой из стали 4ХВМФС

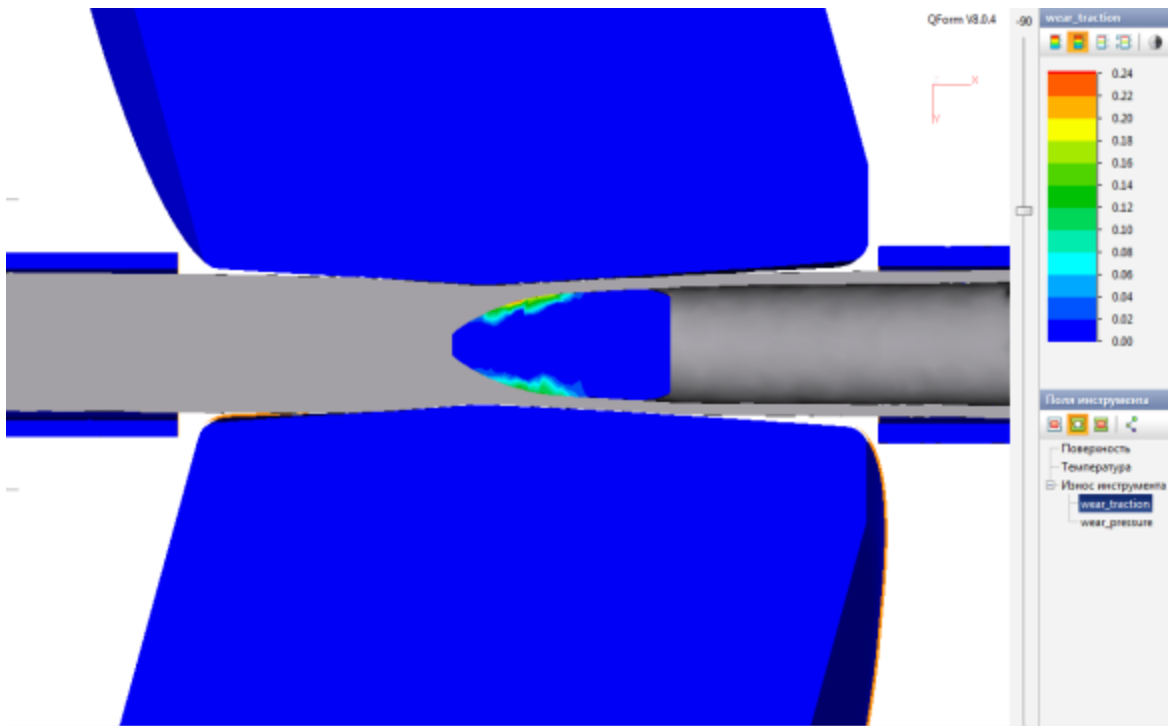


Рисунок 27 – Моделирование касательного износа во время двухвалковой прошивки с оправкой из стали 20ХН4ФА

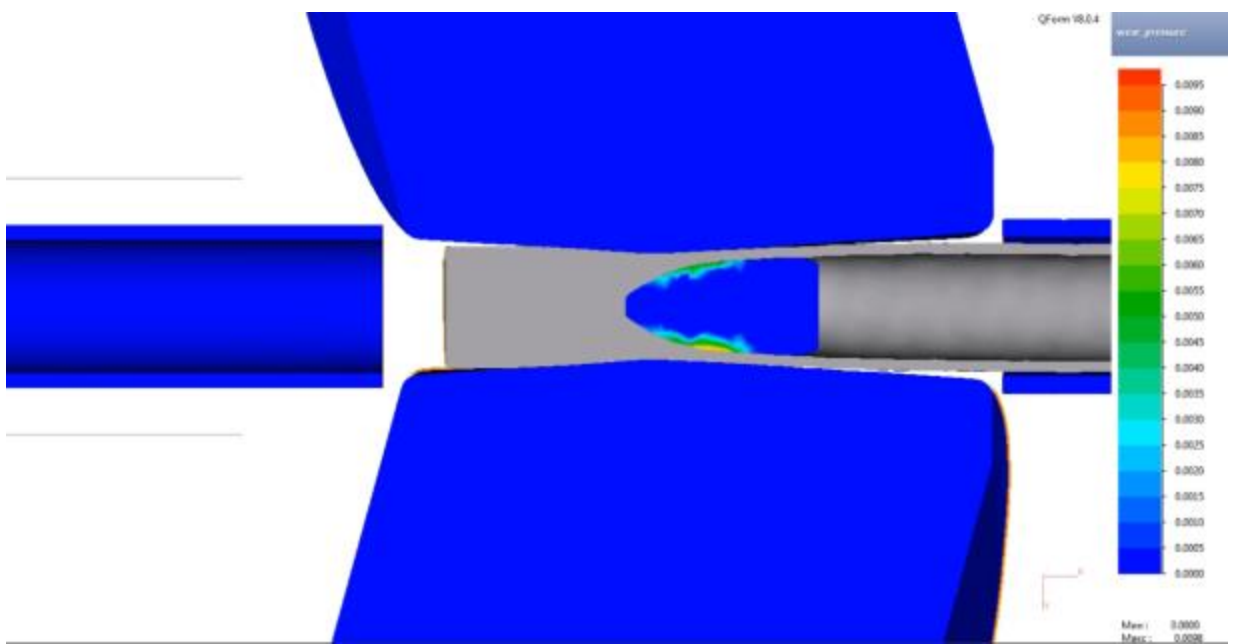


Рисунок 28 – Моделирование нормального износа во время двухвалковой прошивки с оправкой из стали 20ХН4ФА

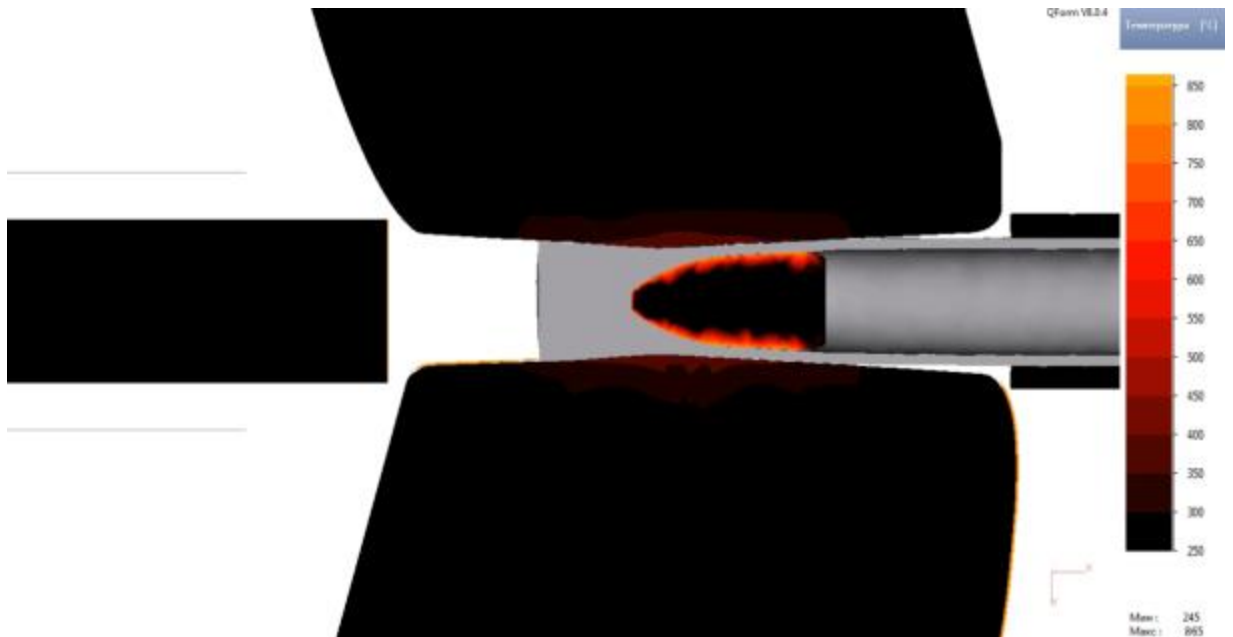


Рисунок 29 – Моделирование нагрева во время двухвалковой прошивки с оправкой из стали 20ХН4ФА

4.5 Анализ результатов моделирования

На рисунках ниже представлены графики зависимости температуры оправки, нормального и касательного износа во время процесса прошивки на каждый миллиметр сечения. В качестве сечения, была выбрана область, наиболее подверженная износу и нагреву согласно данным компьютерного моделирования.

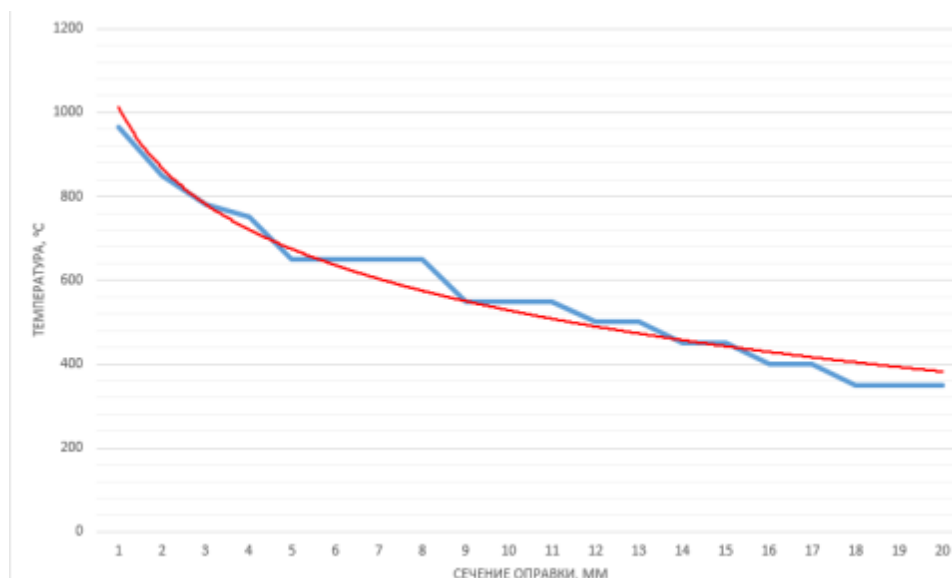


Рисунок 30 – График распределения температуры по сечению оправки, изготовленной из стали 4ХВМФС

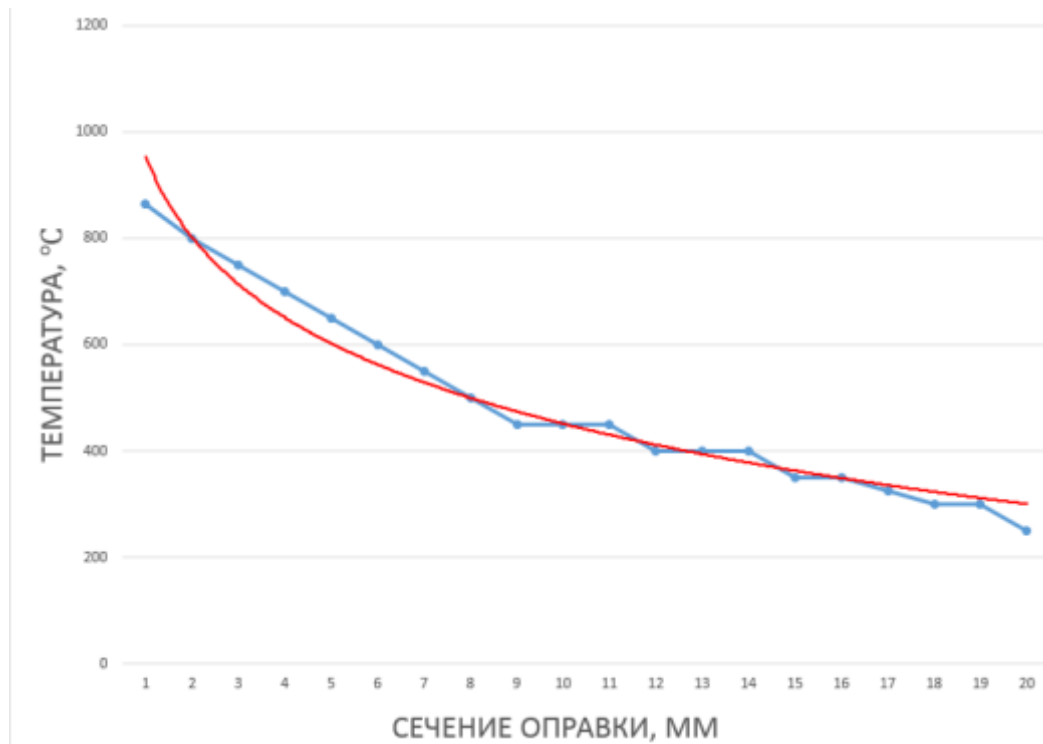


Рисунок 31 – График распределения температуры по сечению оправки, изготовленной из стали 20ХН4ФА

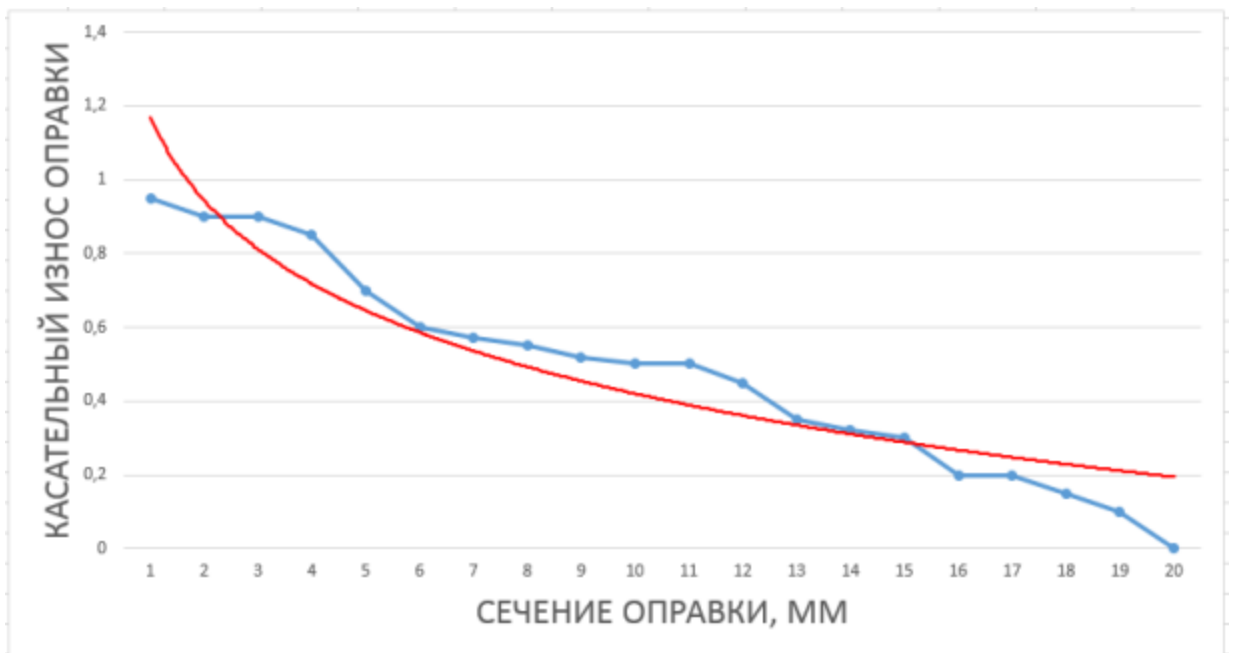


Рисунок 32 – График распределения касательного износа по сечению оправки, изготовленной из стали 4ХВМФС

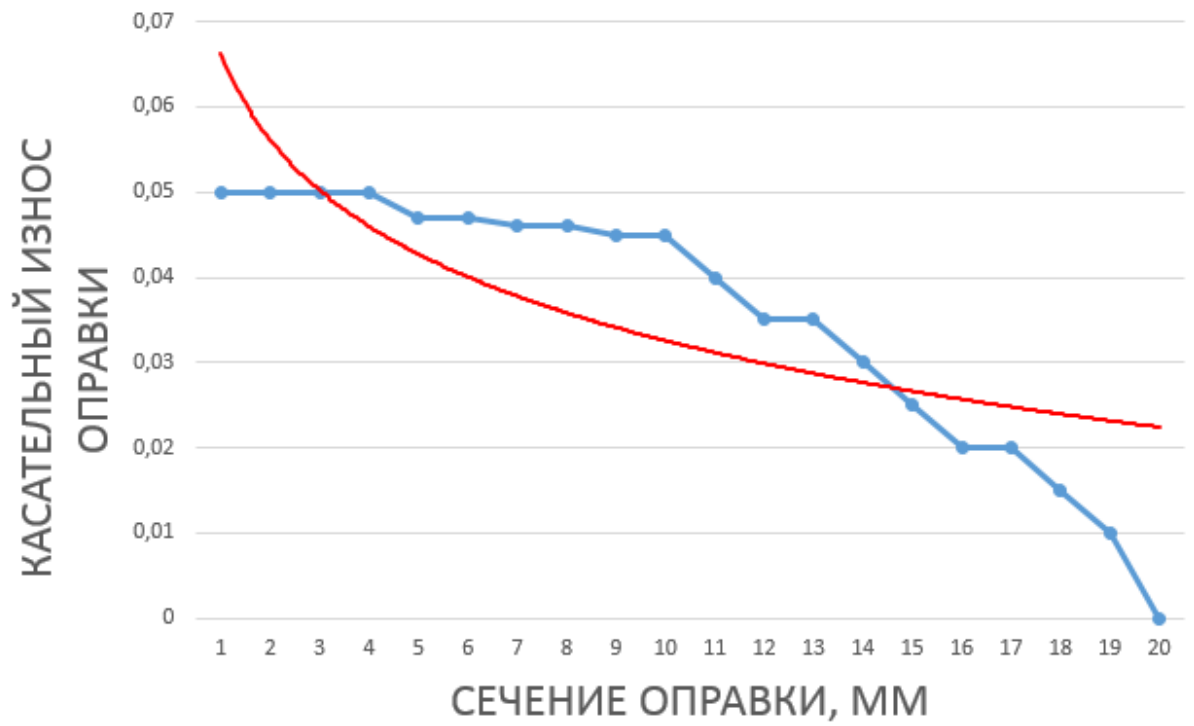


Рисунок 33 – График распределения касательного износа по сечению оправки, изготовленной из стали 20ХН4ФА

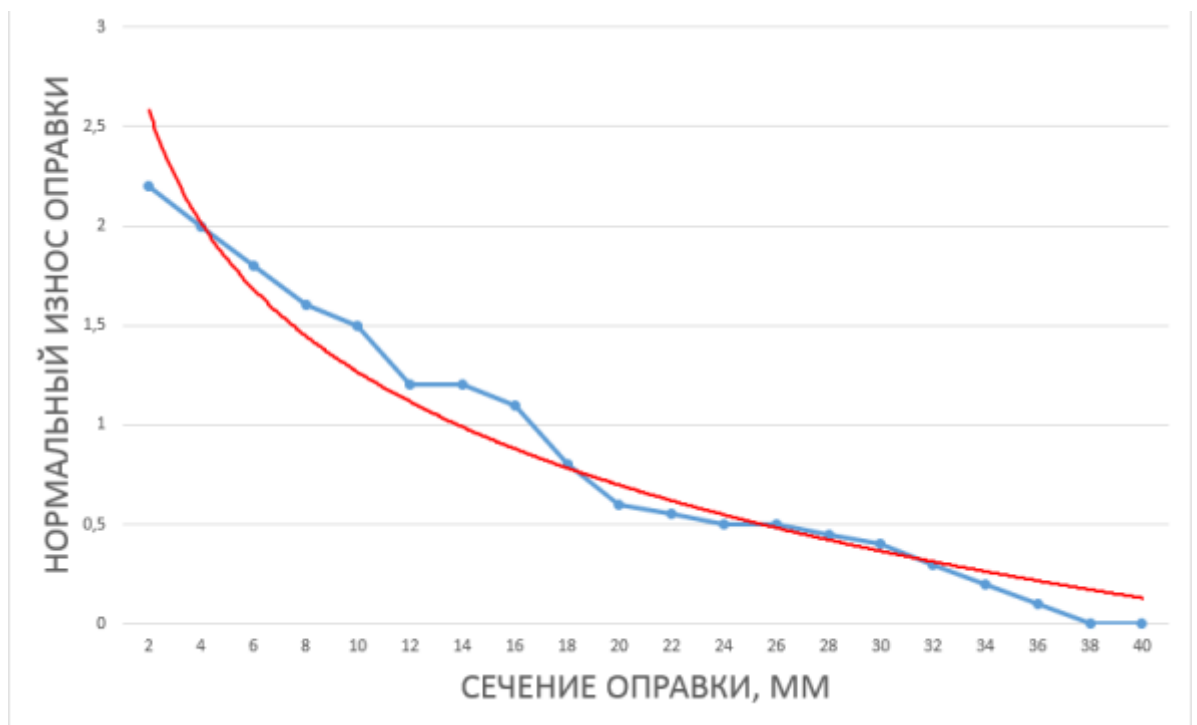


Рисунок 34 – График распределения нормального износа по сечению оправки, изготовленной из стали 4ХВМФС

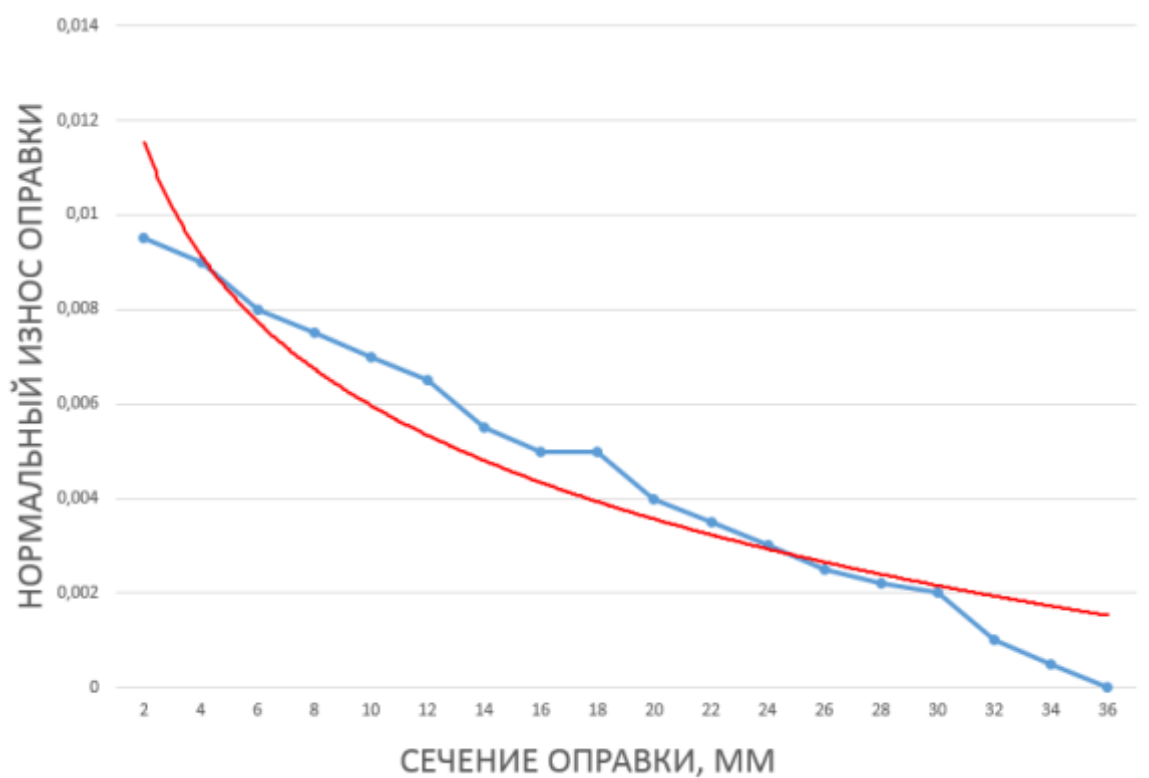


Рисунок 35 – График распределения нормального износа по сечению оправки, изготовленной из стали 20ХН4ФА

Данные, полученные в ходе компьютерного моделирования, показывают значительное влияние марки стали, из которой изготовлена оправка прошивного стана, на показатели как нормального, так и касательного износа.

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОПРАВОК

Из результатов компьютерного и физического моделирования выявлено, что наиболее нагруженными являются носок и сферическая часть оправки, следовательно, поиск решений для увеличения срока службы прошивного инструмента необходимо начинать с повышения стойкости этих областей. Рационально возможными представляются следующие способы: изготовление оправок из материалов с повышенными эксплуатационными свойствами, наплавка жаропрочных материалов на наиболее нагруженные области, либо изготовление составных оправок.

Использование оправок полностью, изготовленных из жаропрочных и износостойких материалов, лишь в редких случаях является необходимым и обоснованным. При относительной дороговизне они практически идентичны по износостойкости с составными оправками [52], где узлы оправки, подвергаемые максимальной нагрузке, также выполнены из легированных материалов.

Стоит также учесть что работа [52] показала значительное влияние наплавки только при толщине от 4 мм, что ставит под сомнение целесообразность принимаемых мер. Помимо этого наплавление, в большинстве случаев, используется на использованную, изношенную оправку, что изначально приводит к неблагоприятным простоям.

5.1 Внедрение составных оправок с носком, изготовленным из жаростойких материалов

Другим решением для увеличения стойкости является изготовление составных оправок с применением жаропрочного сплава в качестве материала носка, подверженного наибольшему воздействию высоких температур, соединенного с телом оправки из обычной стали. Варианты изготовления этих оправок могут различаться способом соединения носка и основной части оправок:

по резьбе и сваркой трением. Известны положительные результаты использования составных несменяемых оправок с приваренным носком [53].

Применение составных оправок с соединением носка по резьбе также является нецелесообразным, так как при несоблюдении технических условий, во время изготовления или установки оправки, неизбежно появление зазоров между составными частями, что приводит к плохому теплоотводу и преждевременному выходу из строя. Что подтверждается работой [52], согласно исследованию, реальные испытания составной оправки в производственных условиях почти сразу показали её полную непригодность. Оправка проработала всего 8 проходов, после чего вышла из строя.

Оставшийся вариант – использование составной оправки, с носком из жаропрочных материалов является наиболее приемлемым и актуальным в данный момент. В связи с чем было принято решение провести компьютерное моделирование нагрева и охлаждения оправки, используя необходимые данные из работы [40], а также программный комплекс Flow Works.

Для изучения условия работы водоохлаждаемых оправок, изготовленных с помощью сварки, проведено моделирование теплового состояния при прошивке на составной оправке с приваренным носком, в результате которого установлено: температура на поверхности носка составила 1016°C , а на рабочей части, прилегающей к соединению – 680°C (рисунок 36). В цикле наружного охлаждения отмечается уменьшение объема с повышенной температурой в области соединения, по сравнению с оправкой без использования сварки, что свидетельствует об удовлетворительном теплоотводе и уменьшении температурного воздействия на её основную часть. Но для недопущения работы штатной стали оправки при повышенной температуре целесообразно увеличить длину присоединяемой жаропрочной части до полости охлаждения с большим диаметром и более интенсивным теплоотводом.

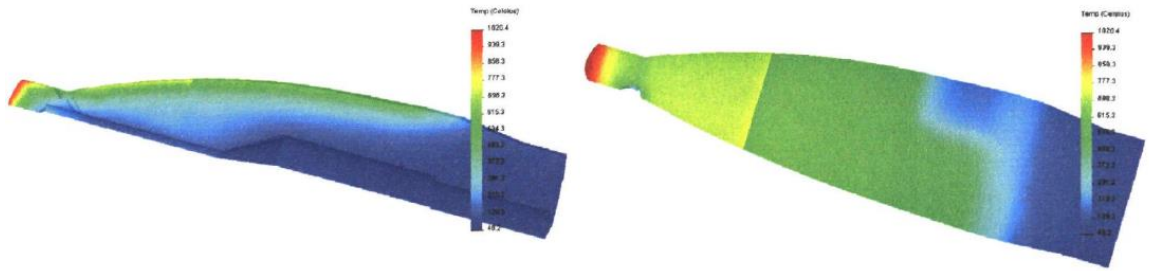


Рисунок 36 – Температурное поле оправки с соединением носка сваркой трением на 7 цикле нагружения

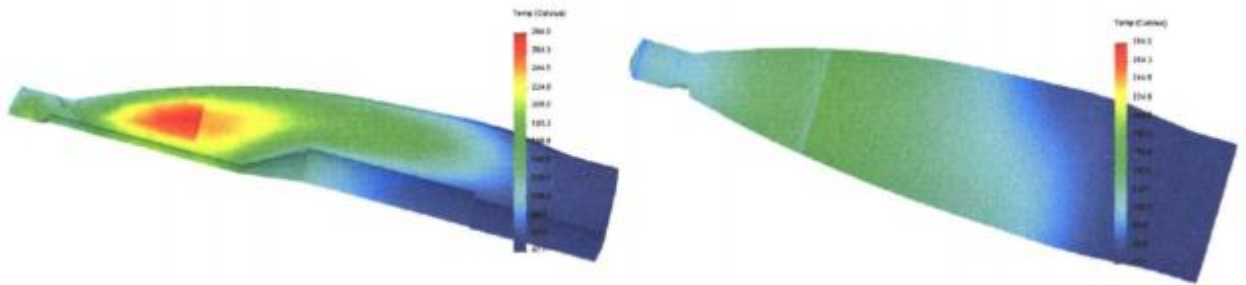


Рисунок 37 – Температурное поле оправки с соединением носка сваркой трением во время 7 цикла охлаждения

Температурное поле составной оправки с увеличенной жаропрочной частью, представленное на рисунке 37 подобно результатам, которые были получены в исследовании [52].

Таким образом, применение сварки трением обеспечивает достаточную теплопроводность, а выбирать длину присоединяемого носка необходимо такой, чтобы основная часть оправки, изготовленная из обычной стали не подвергалась воздействию температур, выходящих за её пределы возможностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен анализ технологий и особенностей раската непрерывнолитых заготовок на двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки, что позволило оценить влияние факторов на износостойкость оправки и провести физическое моделирование.

Выполнено физическое моделирование имитирующее нагрев оправки от контакта с заготовкой, что позволило получить данные об оправке без водяного охлаждения, а также количество имитирующих проходов до выхода оправки в стационарный температурный режим. Полученные данные показали нецелесообразность использования оправок без водяного охлаждения в современных условиях рынка, в связи с низкой износостойкостью и высокой вероятностью образования дефектов.

Проведено компьютерное моделирование процесса прошивки на двухвалковых станах с использованием оправок из двух различных марок сталей. Полученные результаты показали огромное влияние материала оправки на её износостойкость и жаропрочность.

Разработано техническое решение – использование составных оправок с носком из жаропрочных материалов, температурное состояние которых значительно лучше оправок, изготовленных из обычных материалов, что подтвердило компьютерное моделирование, выполненное в программе Flow Works.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейбер. – М.: Металлургия, 1968. – 440с.
2. Матвеев Ю.М., Ваткин Я.Д. Калибровка инструмента трубных станов. – М.: Металлургия, 1970. – 480с.
3. Хавкин Г.О., Бродский В.М., Лисовая Г.В. Сравнительная характеристика водоохлаждаемых оправок прошивного стана, изготовленных различными способами. / Сталь. – 2004 – № 8 – с. 60–62.
4. Боровков А.Н., Светлицкий Е.А. Применение несменяемой оправки на прошивном стане трубопрокатного агрегата 400. / Сталь. –1958. –№ 10. с.926–927.
5. Шапиро И.А., Хавкин Г.О., Бродский В.М. Повышение эффективности использования оправок прошивных станов. / Сталь. – 2009. –№9. – с.75–76.
6. Кауфман М.М. Прошивка заготовок с применением водоохлаждаемых оправок. / Сталь. –1958. –№2. С.144–151.
7. Финкелынтейн Я.С., Щеголь Т.С. Повышение стойкости невращающихся оправок прошивных станов. / Сталь. –1957. –№12. –С. 1099– ПОЗ.
8. Сванидзе Ш.Г. Оправки повышенной стойкости для прошивных станов. / Сталь. –1976-№ 9. – С. –840–841.
9. Прокатка и прессование труб из тугоплавких металлов. / А.П. Коликов, И.Н. Потапов, П.И. Полухин и др. – М.: Металлургия, 1979. 240с.
10. Исследование стойкости технологического инструмента при высокотемпературной винтовой прокатке. / А.П. Коликов, А.В. Крупин, И.Н. Потапов и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1976–№5. –С.125.
11. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Металлургия. 1972. 576с.
12. Обработка металлов давлением: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2008. 960с.

13. Касьян В.Х., Мазур С.В. Влияние температурно-силовых условий деформации на стойкость прошивных оправок. / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003 . –№2. –С.57–61.
14. Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка. – М.: МИСИС, 2000. 128с.
15. Тавадзе Ф.Н., Оклей Л.Н., Жамнерашвили Г.В. Исследование распределения температуры в оправке первой прошивки. / *Сталь*. –1964–№3. – С.252–253.
16. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н.И. Яловой, М.А. Тылкин, П.И. Полухин и др. // Учеб, пособие для вузов. М: Высшая школа, 1973. 631с.
17. Тылкин М.А., Яловой Н.И., Полухин П.И. Температуры и напряжения в деталях металлургического оборудования. М.: Высшая школа, 1970. 428с.
18. Температурный режим и напряженное состояние оправок прошивных станов / И.П. Барыкин, А.М. Вашуров, А.А. Федотов и др. // *Труды УАИ*. –1973 г. –№47. –С.118–122.
19. Баскаков А.П., Толмачев Е.М., Добыт А.Н. Тепловой режим охлаждаемой оправки прошивного стана. / *Сталь*. –2006–№3.С.55–58.
20. Андреев Е.А. Исследование работы валков и оправок прошивных станов. Автореферат кандидатской диссертации. – Днепропетровск, 1972. 182с.
21. Манегин Ю.В., Анисимова И.В. Стекло-смазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов. М.:Металлургия, 1978. 223с.
22. Ведякин Н.М., Ячменев А.Н., Михайлова Л.П. Прошивка труб на оправках со смазкой // *Сталь*. –1974–№2. –с.156–159.
23. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. – Изд.2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 344с.
24. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. Изд.2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. 270с.

25. Процкий Н.Е., Мавродий П.Д. Внедрение охлаждаемых оправок на дисковом прошивном стане // Сталь. –1959–№6–С.546–550.
26. Коликов А.П. Осадчий В.Я., Яралиев Н.Г. Исследование стойкости инструмента прошивных станов. // Известия ВУЗов. Черная металлургия – 1972–№5. –С.94–97.
27. Потапов И.Н., Шаманаев В.И., Соболев А.А. Новая технология получения полых толстостенных заготовок. // Передовой производственный опыт. –1986–№6. –С.6–8.
28. А.с. 1340843 СССР, МКИЗ В21 В25/00. Оправка прошивного стана. К.В. Барабадзе, Веремеевич А.Н., Дрюян В.М. №4050313/31-02
29. Коликов А.П., Крупны А.В., Потапов И.Н. Исследование стойкости технологического инструмента при высокотемпературной винтовой прокатке. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1976–№5. –С.125–128.
30. Изготовление полых профилированных заготовок / Б.А. Романцев, И.Н. Потапов, А.В. Гончарук, В.А. Попов. – М: НПО «ИнформТЭИ», 1992. 266с.
31. Постный В.А., Стовченко А.П., Кирсанов Н.В. Исследование качества и эффективности комбинированной послойной наплавки валков. / Сталь. 1994. – №10. –С.58–60.
32. Садоков Г.М. Повышение стойкости трубопрокатного инструмента // Всесоюзное совещание работников трубной промышленности. Труды научно-технического общества черной металлургии. –1963–Том 33–С. 159–162.
33. Прокатка и прессование труб из тугоплавких металлов. / А.П. Коликов, И.Н. Потапов, П.И. Полухин и др. – М.: Металлургия, 1979. 240с.
34. А.с. 204283 СССР, МКИЗ В21 В25/00. Оправка трубопрокатного стана Манегин Ю.В., Лузин Ю.Ф., Лобашов Б.П. №1099357/22-2
35. Процкий Н.Е. Усовершенствование трубопрокатного инструмента на Южнотрубном заводе // Всесоюзное совещание работников трубной промышленности. Труды научно-технического общества черной металлургии. – 1963 – том 33 – С. 163–166.

36. Белошапко М.В., Кармазина Т.Р. Износ оправок при прошивке заготовок из нержавеющей стали // Днепропетровский металлургический институт. В ЦНИИ Черметинформация 21.11.86 №3687.

37. Дубровский И.В., Матлахов Л.И. Расположение оправки и образование плен на трубах // Сталь. –1947–№7–С.626–629.

38. А.В. Король Анализ стойкости оправок на прошивном стане Дишера / А.В. Король, Д.Ю. Звонарев, А.В. Курятников и др. // Сталь – 2011г. – №2 – С. 59–61.

39. В.А. Кутепов Практика использования оправок прошивного стана с внутренним охлаждением / В.А. Кутепов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы международной практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященной памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В.Л. Колмогорова. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. – С.427-435.

40. Комплексное исследование условий эксплуатации, разработка и внедрение мероприятий по повышению стойкости оправок прошивных станков ТПА-80, ТПА-140: отчет о НИР: 1.21.1-П-101/16 / рук. к.т.н. Д.Ю. Звонарев – Челябинск 2017 – 69с.

41. Материалы сайта http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov

42. Отчет о НИР «Исследование технологической возможности изготовления промышленной партии передельных труб из нержавеющей марок стали с использованием трубопрокатных агрегатов ТПА-140» – 2016. – С.98.

43. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. 602с.

44. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. – 4-е изд. – М.: Наука, 1981. 512с.

45. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. – 5-е изд. – М.: Наука, 1977. 735с.

46. Прилепко А.И., Калиниченко Д.Ф. Асимптотические методы и специальные функции. – М.: МИФИ, 1980. 107с.

47. Polyanin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of Integral Equations. – CRC Press, Boca Raton, 1998. 796p.
48. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. 512с.
49. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Metallurgy, 1990. 239с.
50. Lewis R.W., Nithiarasu P., Seetharamu K.N. Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow. – John Wiley Sons Ltd. 2004. 343 p.
51. Зильберг Ю.В. Теория обработки металлов давлением. Монография. Днепропетровск: Пороги, 2009. 434с.
52. Франценюк И.В., Франценюк Л.И. Современные технологии производства металлопроката на Ново-Липецком металлургическом комбинате. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 208с.
53. Повышение износостойкости оправок прошивного стана. / Романцев Б.А., Матыко О.К., Гончарук А.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. – № 11. – С. 16–19.