

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Станкостроение, материаловедение и технологии
машиностроительного производства»

Кожебекова Фаузия Муратовна

На тему: «Методы повышения эксплуатационных свойств валков прокатного
стана с использованием компьютерного моделирования»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность: 5В071200 - Машиностроение

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Станкостроение, материаловедение и технология
машиностроительного производства»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

СМИ ТМП, PhD,

ассоциированный профессор

Арымбеков Б.С.

2019г.



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Методы повышения эксплуатационных свойств валков
прокатного стана с использованием компьютерного моделирования»
по специальности: 5В071200 - Машиностроение

Выполнил

Кожебекова Ф.М.

Рецензент

канд. техн. наук,

ассоциированный профессор

Смаилова Г.А.

Научный руководитель

канд. техн. наук,

ассоциированный профессор

Орлова Е.П.



« 24 » 04 2019г.

« 1 » 05 2019г.

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Станкостроение, материаловедение и технологии машиностроитель-
ного производства»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
СМиТП, PhD, assoc. проф.
Арымбеков Б. С.

« 6 » ноября 2018г.



ЗАДАНИЕ

На выполнение дипломной работы

Обучающемуся: Кожебековой Фаузии Муратовне

Тема: Методы повышения эксплуатационных свойств валков прокатного стана с использованием компьютерного моделирования

Утверждена приказом Ректора Университета № 1252-б от « 6 » ноября 2018 г.

Срок сдачи законченной работы

« 3 » мая 2019г.

Исходные данные к дипломной работе: Диаметр валка $D = 106$ мм, усилие прокатки $P = 0,141$ МН, максимальный крутящий момент $M = 0,81$ кНм.

Материал - легированной инструментальной сталь 9Х1 с $\sigma_b = 830$ МПа, $n_t = 460$ МПа.

Краткое содержание дипломной работы:

- а) литературный анализ
- б) расчет на прочность и деформацию валка
- в) конечно - элементный расчет прочности валка
- г) методы повышения эксплуатационных свойств валка

Перечень графического материала:

Представлены ___ слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература:

а) Петров В.С., Карманов А.И. Производство валков холодной прокатки. - М.: Машиностроение, 1978 г. - 205 с;

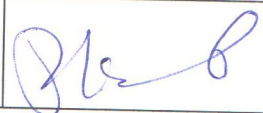
б) Олжабаев Р.О., Итыбаева, Г.Т., Касенов А.Ж. Повышение эксплуатационной стойкости валков прокатного стана. - Вестник наука и техника Казахстана №3, 2005г - с.112 - с.118.

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

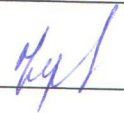
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
Обзор литературы Теоретическая часть	01.02.19 - 15.03.19	Воплощено
Валки холоднопрокатного стана Методы повышения эксплуатационных свойств валка	20.03.19 - 07.04.19	Воплощено
Расчет на прочность Конечно – элементный расчет на прочность Выполнение чертежей	10.04.19 – 20.04.19	Воплощено

Подпись

консультанта и нормоконтролера на законченную дипломную работу
с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Карпеков Р. К., лектор	30.04.2019	

Научный руководитель  Орлова Е.П.

Задание принял к исполнению обучающийся  Кожебекова Ф.М.

Дата

«6» ноября 2018 г.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе был рассмотрен вопрос о повышении срока эксплуатации валка прокатного стана холодной прокатки. В начале ознакомились с назначением и конструкцией валка. Так как долговечность и надежность закладывается на конструкторском и технологическом этапах, был рассмотрен технологический процесс изготовления детали. Предпочтительным методом изготовления прокатного валка является методковки, благодаря которому повышаются надежность и долговечность. Рассмотрены материалы и требования к изготовлению валка. Материалом для валка была выбрана низкоуглеродистая легированная инструментальная сталь марки 9Х1.

Проанализировав эксплуатационные свойства валка такие как износостойкость, усталостная прочность, твердость и их методы повышения, целью стало повысить показатели прочности валка, так как валки холодного проката работают в условиях сложного напряженного состояния и основными причинами выхода из строя валков является разрушение поверхностного слоя бочки, носящее контактно- усталостный характер и износ. Для этого были произведены прочностные расчеты, смоделирована конечно - элементная модель валка в программе Solidworks, произведен компьютерный расчет в программе Inventor. Итогом произведенных расчетов стало выявление недостаточной прочности в шейке валка.

Для повышения усталостной прочности изменили размер валка, проверив предыдущими расчетами. Итогом работы стало повышение работоспособности валка путем увеличения усталостной прочности.

АҢДАПТА

Дипломдық жұмыста суықтай илектену станогының орамасының өмір сүру ұзақтығы туралы мәселе қаралды. Біріншіден, біз орамның мақсаты мен дизайнын таныдық. Дизайн және технологиялық кезеңдерде беріктігі мен сенімділігі қойылғандықтан, өндірістің технологиялық процесі қарастырылды. Дайындау цехын жасаудың қолайлы тәсілі - бұл сенімділік пен беріктікті арттыратын соғу әдісі. Роликті дайындау бойынша материалдар мен талаптар қарастырылды. Орамдағы материал 9Х1 төменгі көміртекті қорытпа құралы таңдалды.

Тозуға төзімділік, шаршау күші, қаттылық және оларды жақсарту әдісі сияқты орамның операциялық қасиеттерін талдағаннан кейін, роликтің беріктігін арттыру мақсаты болды, себебі суық роликтер күрделі күйде жұмыс істейді және орамалардың істен шығуының негізгі себептері бөшекелердің беткі қабатын бұзу болып табылады - Шаршау сипаты мен тозуы. Осы мақсатта күш есептеулер жасалды, Solidworks бағдарламасындағы орамның элементінің модельденді және Inventor бағдарламасында компьютер есептеу жүргізілді. Есептеулердің нәтижесі орамдағы мойынның жеткілікті беріктігін анықтау болып табылды.

Шаршау күшін арттыру үшін, бұрынғы есептеулерді тексеру арқылы орамның мөлшері өзгерді. Жұмыстың нәтижесі шаршау күшін жоғарылату арқылы орамды өнімділігін арттыру болды.

ANNOTATION

In this thesis work was considered the issue of increasing the operating life of the roll of the cold rolling mill. First, we got acquainted with the purpose and design of the roll. Since durability and reliability are laid at the design and technological stages, the technological process of manufacturing the part was considered. The preferred method of manufacturing a mill roll is the forging method, which increases reliability and durability. Considered materials and requirements for the manufacture of the roll. The material for the roll was selected low carbon alloyed tool steel grade 9X1.

After analyzing the operational properties of the roll, such as wear-resistance, fatigue strength, hardness and their methods of improvement, the goal was to increase the roll strength, since the cold-rolled rolls work in conditions of a complex stress state and the main causes of failure of the rolls are the destruction of the surface layer barrels bearing contact fatigue character and wear. For this purpose, strength calculations were made, the coarse element model of the roll in the Solidworks program was modeled, and a computer calculation was made in the Inventor program. The result of the calculations was the identification of insufficient strength in the neck of the roll.

To increase the fatigue strength, the size of the roll was changed by checking the previous calculations. The result of the work was an increase in the workability of the roll by increasing fatigue strength.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Общие сведения о прокатных валках	10
1.1	Назначение и конструкция прокатных валков для холодной прокатки	10
1.2	Материал и требования для изготовления валков	11
1.3	Методы и технологический процесс изготовления детали	13
2	Анализ эксплуатационных свойств валка и его расчет на прочность	18
3	Компьютерное моделирование валка	28
3.1	Конечно-элементный расчет прочности и перемещения	28
3.2	Повышение прочности шейки валка	32
	Заключение	34
	Список использованной литературы	35
	Приложение А	
	Приложение Б	

ВВЕДЕНИЕ

Главной и основной проблемой машиностроения является увеличение срока эксплуатации механизмов и машин. Важным показателем, что определяет спрос на проектируемый объект и есть его качество.

Надёжность и долговечность листопрокатных валков являются решающими факторами, определяющими качество продукции, производительность и экономическую эффективность работы станов холодной прокатки. Поэтому проблема повышения качества валков в условиях внедрения в прокатное производство станов непрерывной и бесконечной прокатки является также актуальной. В связи с этим решение этой проблемы требует комплексного подхода к процессу изготовления валков холодной прокатки, позволяющего найти рациональное сочетание технологических операций, а также всестороннего изучения условий эксплуатации валков.

1 Общие сведения о прокатных валках

1.1 Назначение и конструкция прокатных валков для холодной прокатки

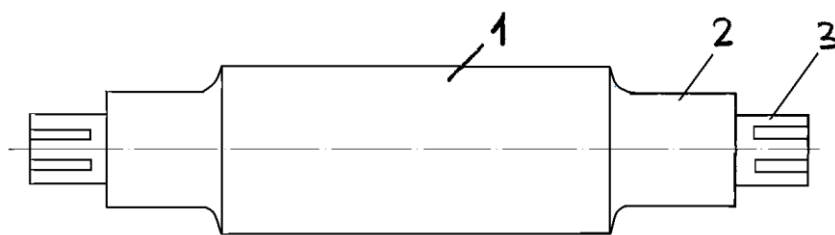
Прокат металла - операция достаточно сложная, энергозатратная и требующая наличия специальных навыков и знаний от персонала. Обжатие материала, которое производит прокатный валок, позволяет достичь определённых размеров обрабатываемого профиля. Важно знать, что валки в процессе своей работы берут на себя внушительное усилие, которое возникает непосредственно в процессе работы всей прокатной линии. Именно поэтому прокатный валок (рисунок 1.1) - наиболее изнашивающаяся часть любого прокатного стана [1].



Рисунок 1.1 - Прокатные валки [1]

Все прокатные валки имеют три основных компонента (рисунок 1.2), в числе которых:

- бочка валка. Именно она находится в непосредственном контакте с нагретым и подвергаемым обработке металлом. У бочки есть два главных линейных параметра - длина (L) и диаметр (D);
- шейки (опорные части) - расположены по бокам от бочки и опираются на подшипники валка. Также характеризуются длиной и диаметром;
- приводной конец [1].



1 - бочка; 2 - шейка; 3 - приводной конец

Рисунок 1.2 - Компоненты валка [1]

Листовые прокатные валки, изготовление которых - достаточно трудоемкий процесс, выполняют прокатку ленты, полос. Бочка у таких валков гладкая, выполнена в цилиндрической форме [1].

1.2 Материал и требования для изготовления валков

Для изготовления валков холодной прокатки обычно используются высокоуглеродистые легированные стали марок 9Х и 9Х2. Сталь марки 9Х используется для валков с твердостью 90 единиц по Шору и выше при диаметре бочки до 300 мм, а сталь 9Х2 для рабочих валков диаметром больше 300 мм.

В связи с повышением скоростей прокатки возникла необходимость увеличения глубины закаленного слоя, вследствие чего начинают применяться глубокопрокаливающиеся стали марок 9Х2Г и 9Х2МФ. Послековки валки подвергаются отжигу для предотвращения образования флокенов и получения зернистого перлита. Мелкие валки диаметром до 210 мм проходят отжиг одновременно с улучшением в состоянии поковки.

Прокатные валки станов холодной прокатки работают в весьма тяжелых условиях с большими статическими и динамическими нагрузками, и поэтому к ним предъявляются высокие требования по прочности, пластичности и износостойчивости. Твердость поверхности бочки рабочих валков должна быть 90-102 единицы по Шору, что превышает твердость закаленной быстрорежущей стали.

Твердость поверхности бочки рабочих валков диаметром свыше 500 мм должна соответствовать техническим условиям, согласованным между заводом-изготовителем и заводом-потребителем валков. Твердость закаленной бочки опорных валков задается в пределах 45-85 единиц по Шору, т.е. должна быть значительно ниже твердости рабочих валков. Это снижает вероятность передачи в процессе прокатки различных дефектов с поверхности опорных валков на рабочее. Цельнокованные валки холодной прокатки в зависимости от твердости закаленной поверхности бочки делят на классы. Данная градация представлена в таблице 1 [2].

Таблица 1 - Классы цельнокованых валков холодной прокатки в зависимости от твердости закаленной поверхности бочки [2]

Класс	Твердость по Шору
А (рабочие валки)	95 - 102
Б (рабочие валки)	90 - 94
В (опорные валки)	70 - 85
Г (опорные валки)	45 - 69

Бочка валков должна характеризоваться одинаковой твердостью по всей площади в пределах, предусмотренных государственным стандартом или техническими условиями для валков данного класса. Кромки бочек должны характеризоваться более низкой твердостью. Во избежание появления трещин их предохраняют от резкого охлаждения во время закалки.

При выборе допустимой ширины проката (листа или ленты) для данного стана следует принимать во внимание ширину кромок валков с более низкой твердостью, составляющую 25-55 мм в зависимости от длины бочки валка. Шейки рабочих и опорных валков подвергаются незначительному износу по сравнению с бочкой и их нормальная твердость по Шору 30-55.

Наружная поверхность валков должна быть гладкой и чистой без острых кромок и дефектов, видимых невооруженным глазом. К дефектам поверхности относят трещины, волосовины, плены, раковины, закаты, неметаллические включения, вмятины, глубокие риски от резца и т.д. На поверхности осевых отверстий и камер также не должно быть острых кромок и перечисленных выше дефектов.

Согласно ISO 468, чистота обработанных поверхностей бочки и шейки валков должна быть не ниже 7 класса, а чистота поверхности осевых отверстий и камеры не ниже 4 класса.

Для производства валков холодной прокатки следует выбирать сталь, характеризующуюся хорошей прокаливаемостью, высокими пластическими и прочностными свойствами, без наружных и внутренних дефектов: флокенов, трещин, неметаллических включений и пр. [2].

Перечисленным выше свойствам в основном отвечает высокохромистая сталь типа 9Х с добавлением некоторых легирующих элементов в зависимости от назначения и размера валков.

Сталь марки 9Х1 является низкоуглеродистой легированной инструментальной сталью, которая не предназначена для сварочных работ. Ей присуща чувствительность к образованию флокенов и небольшая склонность к отпускной хрупкости. Всё это предопределяет относительно узкую область применения сплава [3].

Инструментальная легированная сталь 9Х1 используется для изготовления:

- опорные/ рабочие валки станов холодной прокатки;

- рабочие валки крупносортовых, рельсобалочных, проволочных сортовых/ обжимных станов горячей прокатки, работающие в условиях умеренных/ минимальных ударных нагрузок при интенсивном износе;

- опорные составляющие валков станов для горячей листовой прокатки металла;

- пробойники, клейма, деревообрабатывающий инструмент, холодновысадочные штампы, другие изделия.

Легирующий элемент хром находится в данном сплаве в количестве 1,5%. Процентное соотношение остальных химических элементов представлено в таблице 2 [3]

Таблица 2 - Химический состав стали марки 9Х1, % [3]

Fe	~95
C	0,8 - 0,95
Ni	до 0,35
S	до 0,03
P	до 0,03
Cr	1,4 - 1,7
Mo	до 0,2
W	до 0,2
V	до 0,15
Ti	до 0,03
Cu	до 0,3
Mn	0,15 - 0,4
Si	0,25 - 0,45

1.3 Методы и технологический процесс изготовления детали

Существует два метода получения прокатных валков.

Современное производство прокатных валков в качестве одного из основных методов предусматривает способ центробежного литья. Этот метод является весьма дорогостоящим, однако он в полной мере позволяет по максимуму уплотнить структуру металла наружной поверхности, которая и является рабочей у валка. Такой подход позволяет в значительной степени увеличить срок службы изделия. Для данного способа применяют специальную машину, имеющую горизонтальную ось вращения формы центробежного литья. Сама форма установлена на опорные ролики. Приводные ролики смонтированы таким образом, что в полной мере обеспечивают синхронизацию процесса вращения. Расположенный вверху страховочный ролик имеет зазор относительно обода катания

формы. Для поглощения вибрации между роликами и ступицей имеются демпфирующие прокладки. Снижение уровня вибрации и колебания формы сводит к нулю вероятность получения брака.

Литье валков центробежным методом осуществляют из высоколегированного чугуна. Во вращающийся вокруг своей вертикальной оси кокиль заливают металл, объем которого находится в пределах 95 % от всего объема рабочего слоя прокатного валка. Неоспоримыми преимуществами центробежного литья являются: Обеспечение высокой плотности валка. Повышение износостойкости валка. Отсутствие раковин, пустот, неметаллических включений, шлака.

Методковки. Это самый дорогостоящий метод производства прокатных валков, который тем не менее дает возможность максимально упрочнить полностью все тело валка. Благодаря этому существенно повышаются надёжность и долговечность. Сама же ковка выполняется на специальных автоматизированных комплексах, разработанных и изготовленных с использованием передовых технологий. Мощность этих агрегатов может составлять до 150 МН. Полученные таким способом валки чаще всего применяют на блюмингах и слябингах, а также сортовых станах. Эти стальные валки обладают повышенным коэффициентом трения в момент соприкосновения с прокатываемой заготовкой. Такой нюанс крайне важен для клетей с высокой степенью обжатия. Сама по себе ковка предусматривает следующие операции:

- билетировку слитка;
- осадку;
- протяжку;
- ковку на размер поковки;
- обработка прокатных валков послековки предусматривает сложную термическую обработку, заключительным этапом которой непременно являются поверхностная закалка и отпуск.

Процесс производства валков холодной прокатки состоит из двух обособленных циклов: металлургического и механического.

К металлургическому циклу относятся: выплавка стали, ковка слитков и заготовок, а также термическая обработка поковок и валков, включая отжиг, нормализацию, улучшение, закалку и низкий отпуск.

Цикл механической обработки включает токарные, сверлильные, фрезерные, расточные, шлифовальные и все слесарные операции.

Цикл механической обработки валков холодной прокатки состоит из четырех этапов.

Первый этап - обработка под улучшение. Получение наружных поверхностей с шероховатостью $Ra = 12,5$ с припуском 8-12 мм; глубокое сверление центрального канала и при необходимости растачивание камеры.

Второй этап - обработка под закалку. Получение наружных поверхностей с шероховатостью $Ra = 1,6-3,2$ с припусками 3-6 мм на шейках и 0,5-1,5 мм на бочке; обработка всех мелких поверхностей (шлицев, отверстий и др.).

Третий этап - обработка закаленных валков под второй отпуск для снятия напряжений. Получение поверхности бочки и шеек с чистотой $Ra=0,4$ [4].

Четвертый этап - обработка после второго отпуска до финальной приемки. Получение шероховатости поверхности бочки $Ra=0,4-0,8$; обработка бочки на верхнем пределе допуска.

Типовой технологический процесс механической обработки на валки следующий.

Разметочная. Нанести осевые и разметить центры.

Центрование. Произвести центрование валков на расточном станке.

Токарная. Обработать валок грубо с припуском 8-12 мм на диаметр. Со стороны одного из торцов, оговоренных чертежом заготовки, выточить бурт для подвешивания валка при термической обработке в вертикальных печах. На шейках на расстоянии 200-300 мм от концов валка проточить на верность выточки под $Ra = 3,2$ шириной 100-150 мм для установки в люнет станка глубокого сверления. По концам валка сделать надрезы с учетом припуска 3-5 мм на торец.

Отрезная. Отрезать концы заготовки на пиле по надрезам.

Сверлильная. Обработать в центре валка отверстие на станке глубокого сверления с целью уменьшения закалочных напряжений.

Минимальные допустимые диаметры осевого отверстия выбираются в зависимости от диаметра бочки и твердости валков.

Если требуемый размер осевого отверстия опасен для прочности шейки вала, то в полости бочки растачивается «камера». Переходы от осевого отверстия к камере выполняются плавными по радиусам для избежания концентрации напряжений, которые могут возникнуть при термической обработке валка.

Сверлильная (для валков с камерой). Расточить камеру валка.

Для этой операции применяют специальные борштанги с поворотной режущей пластиной. Пластина разворачивается после ввода штанги в отверстие валка. Растачивание камер производится двумя методами - при работе борштангами на сжатие и на растяжение.

За последнее время второй метод находит все более широкое распространение. Применение этого метода резко сокращает случаи поломки инструмента, позволяет увеличить подачу при растачивании в два раза и производить обработку за один проход вместо двух-трех проходов. Так как при обработке камер применяется дорогостоящая оснастка, размеры камер должны быть нормализованы.

Термическая. «Улучшение» производится после глубокого сверления.

Токарная. Крепить валок в кулачках и грибовых центрах при отверстии диаметром до 165 мм. При большем диаметре крепление производится через бугель. Бочку и шейки валков обрабатывать с припуском [4].

При наличии на шейках различных мелких выточек или буртов эти выточки не выполняются и вся шейка обтачивается на один диаметр. Обработка под закалку должна быть выполнена с шероховатостью поверхности $Ra=0,4-0,8$. Валки не должны иметь острых кромок и рисок, кругом должны быть сняты фаски и галтели. На это обстоятельство требуется обращать особое внимание, так как несоблюдение этих условий может привести к концентрации напряжений

при закалке и разрушению валка. Бурт на шейке для подвешивания валка в вертикальной печи в данной операции не удаляется.

Перед закалкой производится обработка различного рода мелких поверхностей. Трефы обрабатывают на специальных трефозерных или на расточных станках в размер за исключением тех валков, у которых толщина стенок от отверстия до впадины трефа меньше 20-30 мм. Шпоночные пазы или квадраты фрезеруются на продольно-фрезерных станках с припуском 2 мм на сторону. Радиальные отверстия, если они требуются, сверлятся в размер.

Перед закалкой валок проходит слесарную зачистку острых кромок и поступает в термический цех.

Термическая. Закалить валок до необходимой твердости.

Токарная. Установить валок в кулачковом патроне и люнете, выверить по бочке в двух сечениях с точностью до 0,25 мм. Произвести растачивание выточек под посадку центровых пробок с переустановкой детали.

Слесарная. Запрессовать пробки. Посадка пробок осуществляется путем охлаждения их в жидком азоте.

Токарная. Установить деталь в центры и обработать бочку до вывода биения на верность. Шейки валков обточить с припуском 0,9 мм на диаметр у валков, проходящих второй отпуск для снятия напряжения и 0,5 мм - у валков, не проходящих второго отпуска. Все остальные поверхности обтачивать в размер.

Шлифовальная (предварительная операция для валков диаметром более 250 мм). Бочку шлифовать на верность до вывода следов резца, полученных при токарной обработке.

В процессе шлифования необходимо следить за охлаждением, интенсивность которого должна быть не менее 25 л/мин, и за своевременной алмазной правкой кругов через 25-30 минут машинного времени. Несоблюдение этих условий может привести к снижению твердости на поверхности валка на несколько единиц или к прижогам, которые вызывают появление сетки микротрещин.

Мелкие операции. Валки, имеющие пазы, трефы, шлицы, проходят окончательную их обработку по разметке и шаблонам, а на специальных станках методом деления. Эти операции, как правило, выполняются твердосплавным инструментом.

Термическая. Валки диаметром более 250 мм после предварительного шлифования проходят дополнительный второй отпуск для снятия напряжений при температуре на 5-10 градусов ниже температуры первого отпуска.

Шлифовальная (чистовая). Бочку валка шлифовать на верность с минимальным снятием слоя. Шейки обработать в размер.

Чистовое шлифование производится при обильном охлаждении и частой алмазной правке кругов.

Контрольная. Окончательно отшлифованные валки после контроля твердости подвергаются травлению 10%-ным водным раствором азотной кислоты с целью проверки отсутствия прижогов и шлифовочных трещин. При обнаружении дефектов валки снова перешлифовываются [4].

Токарная. Установить валок в центры и произвести заправку галтелей твердосплавными радиусными резцами.

После этого валок поступает на слесарную операцию для зачистки мелких дефектов и консервации [4].

2 Анализ эксплуатационных свойств валка и его расчет на прочность

Повышение надежности - одна из важнейших проблем машиностроительного производства. Оно непрерывно возрастает в связи с интенсификацией производства, повышением производительности технологического оборудования. Одним из основных условий, которым должно удовлетворять оборудование является его безотказная работа с необходимой надежностью в соответствии с техническими условиями эксплуатации.

Мероприятия по повышению эксплуатационной надежности и долговечности деталей и оборудования машиностроительного производства включает в себя конструкторские, технологические и организационные мероприятия. В каждом конкретном случае конструктор, технолог и эксплуатационник должен правильно выбрать и использовать наиболее эффективные средства повышения надежности и долговечности.

Проблема надежности должна решаться на всех этапах создания и эксплуатации детали.

Первоначально надежность закладывается при проектировании оборудования. Для обеспечения оптимальной надежности и долговечности оборудования конструктор обязан на стадии проектирования предусматривать определенный их уровень, который должен гарантировать работу оборудования в течении заданного отрезка времени в определенных условиях эксплуатации при минимальных затратах на изготовление и эксплуатацию.

Отказы в машинах происходят в основном по причине износа (абразивного, усталостного, коррозионного, механического и др.). Для увеличения срока службы изнашивающихся деталей используются разнообразные конструкторские, технологические, эксплуатационные методы и приемы. Они основываются на изменении шероховатости и твердости поверхностей сопряженных элементов, режимов механической обработки, химической или термической обработки.

В процессе проектирования необходимо стремиться не только к снижению массы и упрощению конструкции с точки зрения технологичности, но и к повышению долговечности ее деталей. Интенсификация рабочих процессов в оборудовании приводит к повышению динамических нагрузок, то вызывает поломки деталей. Повышение в этом случае долговечности деталей путем увеличения их статической прочности (т.е. увеличения размеров и массы) без расчета на их усталостную прочность, не имеет смысла.

Износостойкость зависит от состава, структуры и механических характеристик материалов, на которые влияют виды технологической обработки. Кроме того, износостойкость определяется геометрическими и физико-химическими параметрами поверхностного слоя, которые формируются во время выполнения технологического процесса [5].

На усталостную прочность деталей влияют механические свойства материалов, состояние его поверхностных слоев и наличие дефектов. При механической обработке в поверхностном слое деталей возникают растягивающие остаточные напряжения, которые снижают предел выносливости. При применении

технологических процессов, создающих сжимающие напряжения, прочностные характеристики деталей улучшаются.

Одной из основных причин выхода из строя деталей машиностроительного оборудования являются поломки. Разрушение происходит вследствие возникновения опасных перегрузок, вызванных недостатком конструкции детали, дефектами технологии изготовления.

О характере поломки можно судить по излому детали. Вид излома позволяет оценить имеющиеся в детали концентраторы напряжений и характер действующих сил. К числу факторов, определяющих чувствительность стали к хрупкому разрушению, относятся геометрия и физическое состояние поверхностного слоя.

Валки холодной прокатки работают в условиях сложного напряженного состояния. Основными причинами выхода из строя валков является разрушение поверхностного слоя бочки, носящее контактно-усталостный характер и износ. В результате многократных плановых шлифовок снимается весь закаленный слой валка, твердость его становится недостаточной и валок необходимо заменить.

Дефекты и повреждения валков холодной прокатки при механической обработке - это кольцевые риски на внутреннем канале, подрезы в местах сопряжений, малый радиус галтелей, не выведенные волосовины и раковины, сетка шлифовальных трещин, несоответствие размеров чертежу.

Поверхностно пластическое деформирование (ППД) является эффективным средством повышения усталостной прочности, улучшения качества поверхности и износостойкости. Технологическими достоинствами упрочнения ППД является малая трудоемкость, отпадает необходимость термических методов упрочнения со свойственными им недостатками.

Обкатка роликами или шариками - простой и наиболее распространенный метод ППД. Обкатка повышает предел выносливости валов на гладких участках на 20-40%, в галтелях на 60-100%, сварных валов - в 2 раза, мест концентраторов и резьб в 2-3 раза.

Известен способ восстановления эксплуатационных свойств прокатных валков, в котором валок с целью удаления разупрочненного слоя (после определенного числа перешлифовок) подвергают токарной обработке на заданную глубину. Недостатком этого способа является низкая стойкость валка вследствие образования на его поверхности дефектов контактно-усталостного характера, т. к. не всегда удается точно определить глубину разупрочненного слоя и удалить его полностью токарной обработкой.

Еще один способ восстановления эксплуатационных свойств прокатных валков, включающий нагрев поверхности валка до температуры отпуска и охлаждение. Недостатком данного технического решения является низкая стойкость валка, т. к. термическая обработка не всегда предотвращает разрушение бочки валка из-за действия накопленных остаточных эксплуатационных напряжений [5].

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому является способ восстановления эксплуатационных свойств прокатных валков, включающий магнитноимпульсную обработку бочки валка.

Недостатком является низкая стойкость прокатных валков, т.к. предлагаемые режимы рекомендованы для валков малого диаметра (не более 100 мм), и обработка ведется при большой напряженности магнитного поля (300-600 кА/м) и длительности импульса 0,5-1,0 с, в результате увеличивается время и снижается качество обработки [5].

Расчеты произвели для случая холодной прокатки полосы шириной $b = 350$ мм и толщиной $h_0 = 3,5$ мм, $h_1 = 2,6$ мм, $\Delta h = 0,7$, $\varepsilon_1 = 26,8\%$.

Расчет напряженного состояния валка при прокатке (рисунок 2.1, приложение А) произвели в следующей последовательности.

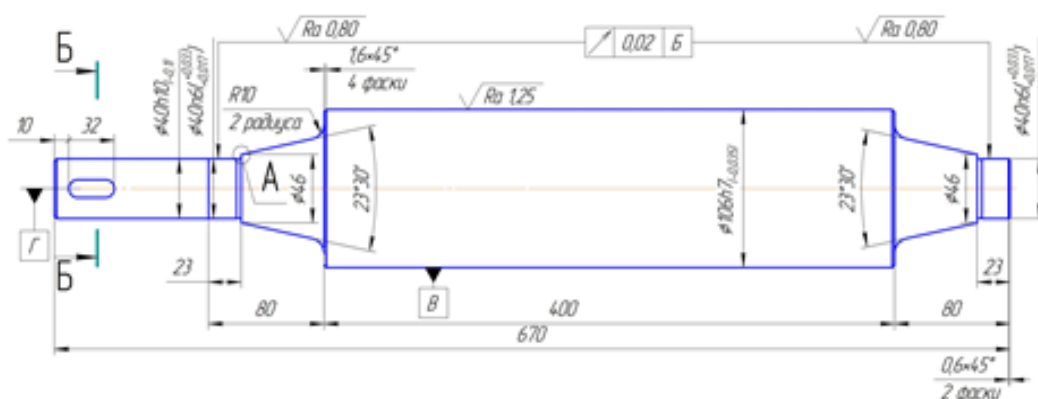


Рисунок 2.1 - Чертеж валка

Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1- Исходные данные

Усилие прокатки P , МН	Максимальный крутящий момент M , кН·м	Разность переднего и заднего натяжений T , кН	D , мм
0,141	0,43	1,007	106

Распределенная нагрузка между рабочим и двумя опорным валками определяли по формуле:

$$q = \frac{P}{b}, \text{ Н/мм}, \quad (2.1)$$

где P - усилие, приходящееся на валок, Н;
 b - ширина полосы, мм.

$$q = \frac{141 \cdot 10}{350} = 403 \text{ Н/мм},$$

Максимальный изгибающий момент посередине бочки рабочего валка от вертикального усилия прокатки рассчитали по формуле:

$$M_p = \frac{P \cdot l}{8}, \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (2.2)$$

где l - длина от опоры до середины бочки валка, м;
 P - усилие, приходящееся на валок, кН.

$$M_p = \frac{141 \cdot 0,27015}{8} = 4,76 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

Максимальный изгибающий момент от разности переднего и заднего натяжений полосы определили по формуле:

$$M_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{4} \left(a - \frac{b}{2} \right), \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (2.3)$$

где T - разность переднего и заднего натяжений, кН;
 b - ширина полосы, м;
 a - расстояние между точками приложения усилия, м.

$$M_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,007}{4} \left(0,54 - \frac{0,35}{2} \right) = 0,046 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

Результирующий изгибающий момент посередине бочки валка рассчитали по формуле:

$$M_{из} = \sqrt{M_p^2 + M_T^2}, \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (2.4)$$

где M_p - изгибающий момент от вертикального усилия, кН·м;
 M_T - изгибающий момент от разности натяжений полосы, кН·м.

$$M_{из} = \sqrt{4,76^2 + 0,046^2} = 4,76 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

Максимальное напряжение изгиба посередине бочки валка определили по формуле:

$$\sigma_6 = \frac{M_{из}}{0,1 \cdot D^3}, \text{ МПа}, \quad (2.5)$$

где $M_{из}$ - результирующий изгибающий момент, кН·м;
 D - диаметр валка, м.

$$\sigma_6 = \frac{0,00476}{0,1 \cdot 0,106^3} = 40 \text{ МПа},$$

Максимальное напряжение изгиба в шейке валка определили по формуле:

$$\sigma_{ш} = \frac{Pl}{0,4 \cdot d_{ш}^3}, \text{ МПа}, \quad (2.6)$$

где P - результирующий изгибающий момент, кН·м;
 l - длина от опоры до середины бочки валка, м;
 $d_{ш}$ - диаметр шейки валка, м.

$$\sigma_{ш} = \frac{0,141 \cdot 0,0197}{0,4 \cdot 0,04^3} = 108,5 \text{ МПа},$$

Напряжение кручения на шейке валка рассчитали по формуле:

$$\tau = \frac{M_{кр} \cdot \psi}{0,2 \cdot d_{ш}^3}, \text{ МПа}, \quad (2.7)$$

где $M_{кр}$ - максимальный крутящий момент, кН·м;
 $\psi = 2,2$ - коэффициент концентрации напряжения для шпоночного паза;
 $d_{ш}$ - диаметр шейки валка, м.

$$\tau = \frac{0,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2}{0,2 \cdot 0,04^3} = 139,2 \text{ МПа},$$

Максимальные эквивалентные напряжения (по четвертой теории прочности) рассчитали по формуле:

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \text{ МПа}, \quad (2.8)$$

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{108,5^2 + 3 \cdot 139,2^2} = 264,4 \text{ МПа},$$

Так как концевая часть валка выполнена цилиндрической с шпонкой под съёмную головку шпинделя, то её рассчитывают только на кручение по формуле:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{0,2d_1^3 - \frac{bh(2d_1 - h)^2}{16d_1}}, \text{ МПа}, \quad (2.9)$$

где d_1 - диаметр концевой части валка, м;
 b - ширина шпонки, м;
 h - высота шпонки, м.

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{0,81}{0,2 \cdot 0,04^3 - \frac{0,012 \cdot 0,007(2 \cdot 0,04 - 0,007)^2}{16 \cdot 0,04}} = 6,363 \text{ МПа}$$

Определение запасов прочности валка. Для изготовления валка выбрали сталь марки 9Х1 (ISO 3887). Механические свойства стали 9Х1 приведены в таблице 2.1.

Для расчета коэффициентов запаса прочности от предела текучести использовали следующие формулы:

Запас прочности:

- в бочке валка

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\sigma}}, \quad (2.10)$$

где σ_T - предел прочности, МПа.

$$n_{\sigma} = \frac{830}{40} = 20,75;$$

- в шейке валка

$$n_{\text{ш}} = \frac{\sigma_T}{\sigma}, \quad (2.11)$$

$$n_{\text{ш}} = \frac{830}{264,4} = 3,14;$$

- в концевой части валка

$$n_{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_k}, \quad (2.12)$$

где τ_s - предел текучести материала, МПа.

$$n_{\tau} = \frac{460}{6,36} = 72,3.$$

Таблица 2.1- Механические свойства стали 9Х1

Марка стали	σ_T , МПа	τ_s , МПа	σ_{-1} , МПа	Термообработка
9Х1	830	460	392	Закалка, низкий отпуск

Все элементы валка, кроме концевой части, имеют коэффициенты запаса прочности ниже допустимого $[n]=5$.

Необходимо произвести расчет валка на циклическую прочность или выносливость, особенно в тех случаях, когда коэффициент запаса статической прочности ниже допустимого $[n]=5$, т.е. расчет шейки валка.

Используя в качестве исходных данных найденные максимальные статические напряжения изгиба и кручения. При этом определим коэффициент запаса усталостной прочности (или запас выносливости) при одновременном действии нормальных и касательных напряжений.

Для стальных валков этот коэффициент рассчитывают по формуле

$$n_y = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}, \quad (2.13)$$

где n_{σ} - запас выносливости по нормальным напряжениям;

n_{τ} – запас выносливости по касательным напряжениям.

Коэффициенты n_{σ} и n_{τ} с достаточной точностью можно определить по упрощенным формулам:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_B \cdot \varepsilon_{\sigma}}{k_{\sigma} \cdot \sigma_{\max}}, \quad (2.14)$$

$$n_{\tau} = \frac{\tau_B \cdot \varepsilon_{\tau}}{k_{\tau} \cdot \tau_{\max}}, \quad (2.15)$$

где ε_{σ} и ε_{τ} - масштабные факторы, учитывающие влияние размеров валка при изгибе и кручении соответственно;

k_σ и k_τ - коэффициенты концентрации напряжений при изгибе и кручении в месте перехода шейки валка в бочку (т.е. в галтели).

Значения коэффициентов для стальных валков:

для шейки валка $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_\tau \approx 0.6$; $k_\sigma = k_\tau \approx 1.4$;

Коэффициенты запаса усталостной прочности в шейке валка составляют:

- по нормальным напряжениям по формуле (2.13)

$$n_\sigma = \frac{830 \cdot 0.6}{1.4 \cdot 108.5} = 3.28,$$

- по касательным напряжениям по формуле (2.14)

$$n_\tau = \frac{460 \cdot 0.6}{1.4 \cdot 139.2} = 1.42,$$

- при совместном действии изгиба и кручения по формуле (2.15)

$$n_y = \frac{3.28 \cdot 1.42}{\sqrt{3.28^2 + 1.42^2}} = 1.3,$$

По результатам расчета можно сделать вывод, что шейка валка не удовлетворяет условию усталостной прочности, так как $n_y < n = 2 \div 3$.

Деформация в поверхностном слое валка.

Определили прогиб валка. В начале произвели расчет момента инерции бочки опорного валка:

$$J_1 = \frac{\pi \cdot D^4}{64}, \text{ м}^4, \quad (2.16)$$

$$J_1 = \frac{\pi \cdot 0.106^4}{64} = 6.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4,$$

Далее определили соотношение моментов инерции бочки и шейки валка:

$$\left(\frac{J_1}{J_2} \right) = \left(\frac{D}{d_{\text{ш}}} \right)^4, \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{J_1}{J_2} \right) = \left(\frac{0.106}{0.04} \right)^4 = 49.32 \text{ м}^4,$$

Прогиб валка от изгибающих моментов середине бочки валка определили по формуле:

$$f_1 = \frac{P}{384 \cdot E \cdot J_1} \left[8 \cdot a^3 - 4 \cdot a \cdot b^2 + b^3 + 64 \cdot c^2 \left(\frac{J_1}{J_2} - 1 \right) \right], \quad (2.18)$$

где a - расстояние между опорами опорного валка, м;

b - ширина прокатываемой полосы, м;

$E = 2,1 \cdot 10^{11}$ - модуль упругости, Па;

c - расстояние от опоры до бочки валка, м.

$$f_1 = \frac{141 \cdot 10^3}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 6,2 \cdot 10^6} \left[8 \cdot 0,54^3 - 4 \cdot 0,54 \cdot 0,35^2 + 0,35^3 + 64 \cdot 0,07^2 (49,32 - 1) \right] = 4,57 \cdot 10^{-14} \text{ м},$$

Прогиб опорного валка от поперечных сил в середине бочки валка, (мм) рассчитали по формуле:

$$f_2 = \frac{P}{\pi \cdot G \cdot D^2} \left[a - \frac{b}{2} + 2 \cdot c \cdot \left(\frac{D^2}{(d_{\text{ш}})^2} - 1 \right) \right], \quad (2.19)$$

где $G = 0,82 \cdot 10^{11}$ - модуль сдвига для стали, Па.

$$f_2 = \frac{141}{\pi \cdot 0,82 \cdot 10^{11} \cdot 0,106^2} \left[0,54 - \frac{0,35}{2} + 2 \cdot 0,07 \cdot \left(\frac{0,106^2}{(0,04)^2} - 1 \right) \right] = 0,5885 \cdot 10^{-8} \text{ м},$$

Произвели расчет суммарного прогиба опорного валка посередине бочки:

$$f = f_1 + f_2, \text{ мм}, \quad (2.20)$$

$$f = 0,000457 + 588,5 = 588,51 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 0,05885 \text{ мм},$$

Под действием изгибающих моментов возникает разность прогибов валка в середине бочки валка и в сечении у края прокатываемого листа, которую определили по формуле:

$$\Delta f_1 = \frac{P}{18,8 \cdot E \cdot D^4} (12 \cdot a \cdot b^2 - 7 \cdot b^3), \quad (2.21)$$

$$\Delta f_1 = \frac{141 \cdot 10^3}{18,8 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,106^4} (12 \cdot 0,54 \cdot 0,35^2 - 7 \cdot 0,35^3) = 0,05466 \text{ мм},$$

Под действием поперечных сил возникает разность прогибов валка в середине бочки валка и в сечении у края прокатываемого листа, которую рассчитали по формуле:

$$\Delta f_2 = \frac{P}{\pi \cdot G \cdot D^2} \cdot \frac{b}{2}, \text{ мм}, \quad (2.22)$$

$$\Delta f_2 = \frac{141 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,82 \cdot 10^{11} \cdot 0,106^2} \cdot \frac{0,35}{2} = 0,0705 \text{ мм},$$

Под действием изгибающих моментов и поперечных сил возникает суммарная разность прогибов валка в середине бочки валка и в сечении у края прокатываемого листа, величину которой определили по формуле:

$$\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2, \text{ мм}, \quad (2.23)$$

$$\Delta f = 0,15466 + 0,1705 = 0,12516 \text{ мм}.$$

Необходимо отметить, что значения прогибов валков является важной информацией для регулирования качества проката и профилирования валков.

Следует отметить, что допускаемые суммарные прогибы для холодной прокатки $f = 0,05 \div 0,3$ мм, а нами рассчитанные значения прогибов валков в каждой клети не превышают допускаемых значений [6].

3 Компьютерное моделирование валка

3.1 Конечно-элементный расчет прочности и перемещения

Анализ литературных данных показал, что путем применение компьютерного моделирования еще мало исследованы упругая деформация валков. Современные компьютерные программы, основанных на методе конечных элементов позволяют исследовать прочность и совместную упругую деформацию рабочих и опорных валков в объемной (3D) постановке.

В связи с вышесказанным, компьютерным моделированием в программах Inventor и Solidworks исследована прочность и жесткость рабочих и валка многофункционального стана.

Методику компьютерного расчета реализовали с использованием программы конечно-элементного анализа Solidworks.

Конечно-элементная модель (КЭМ) валка (рисунок 3.1.1) состоит из 6855 элемента и 10799 узла. Закрепили валок на опорных шейках подшипниковых узлов по трем степеням свободы T_x , T_y , T_z (рисунок 3.1.2), смоделировали расчетную механическую схему, включающую распределение нагрузки по ширине прокатываемого листа, подвод крутящего момента к валку. Материалом валка был принят Сталь 9Х1 со следующими механическими свойствами: модуль упругости - $2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона - 0,283; модуль Сдвига - $8,1839 \cdot 10^{10}$ Па.

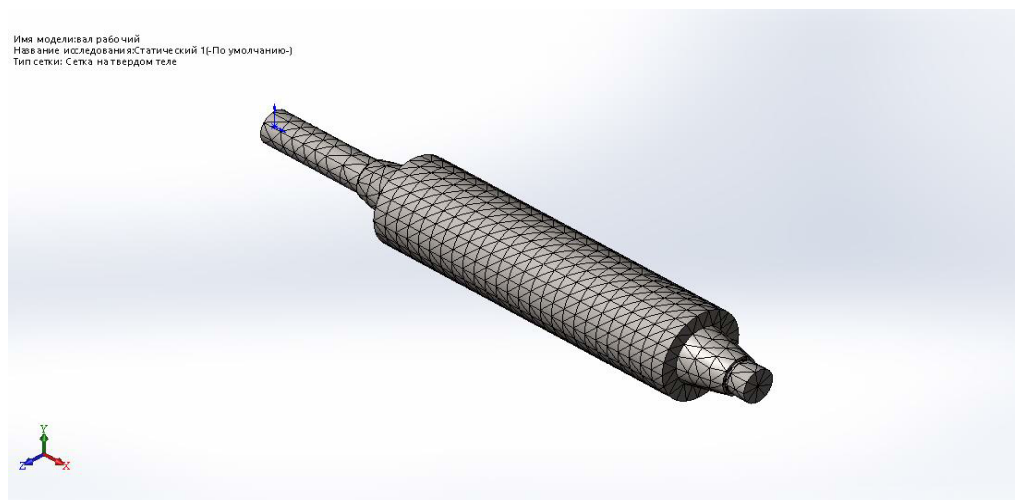


Рисунок 3.1.1 - Сетка валка

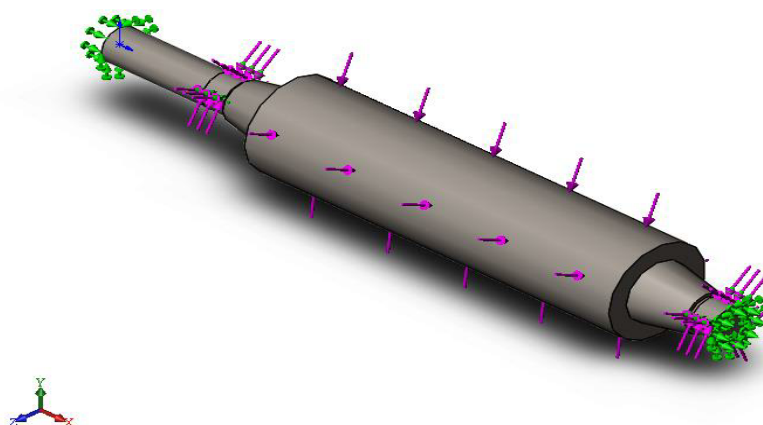


Рисунок 3.1.2 - Расчетно - механическая схема валка

Проверяем величину отношения усилия прокатки на единицу ширины полосы при прокатке в четвертой клетки стана по формуле 2.1:

$$\frac{P}{b} = \frac{0,141 \cdot 10^6}{350} = 402,5 \text{ Н/мм, т. е. меньше } 8000 \text{ Н/мм.}$$

Таким образом, сплющивание валка можно не учитывать.

Проведенные исследования показали, по сечению валков не возникают большие по величине эквивалентные напряжения (рисунок 3.1.3). Максимальное напряжение составляет 269 МПа. Полученное максимальное значение эквивалентного напряжения не превышает максимально допустимое значение предела прочности стали 9Х1 (830 МПа).

На основе проведенных расчетов установили, что напряжения в теле валков изменяются в пределах от 14 МПа до 269 МПа, причем максимальное напряжение возникает в шейке валков (рисунок 3.1.3). Полученные максимальные значения эффективного напряжения, не превышают максимально допустимое для данного материала значение предела прочности. Сравнение результатов расчета компьютерного моделирования с результатами аналитических расчетов показало, что в полученных данных имеются определенное различия.

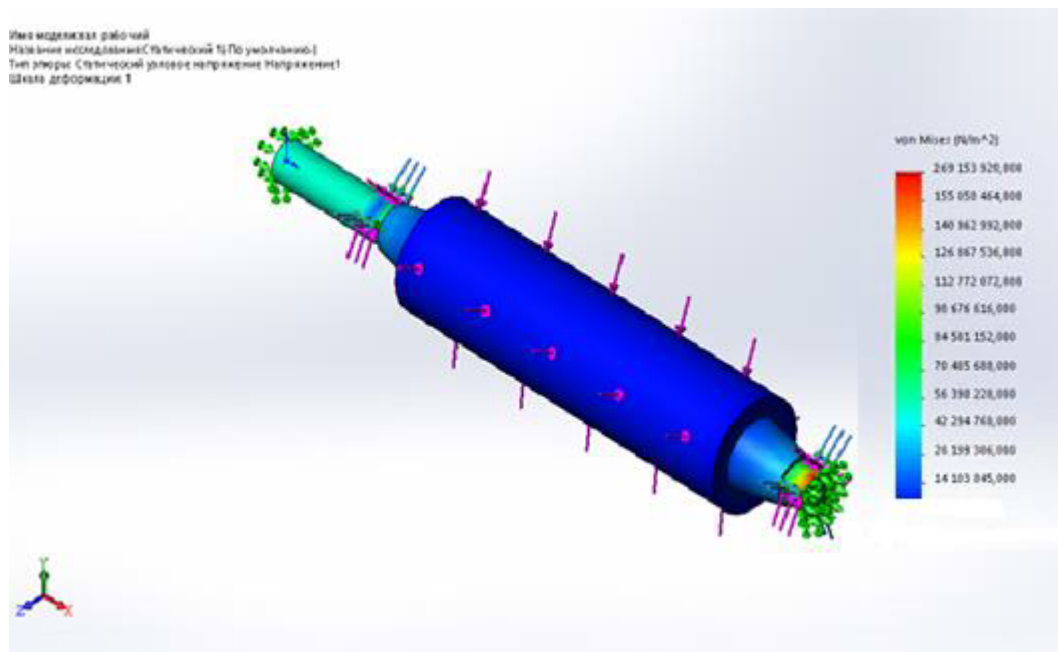
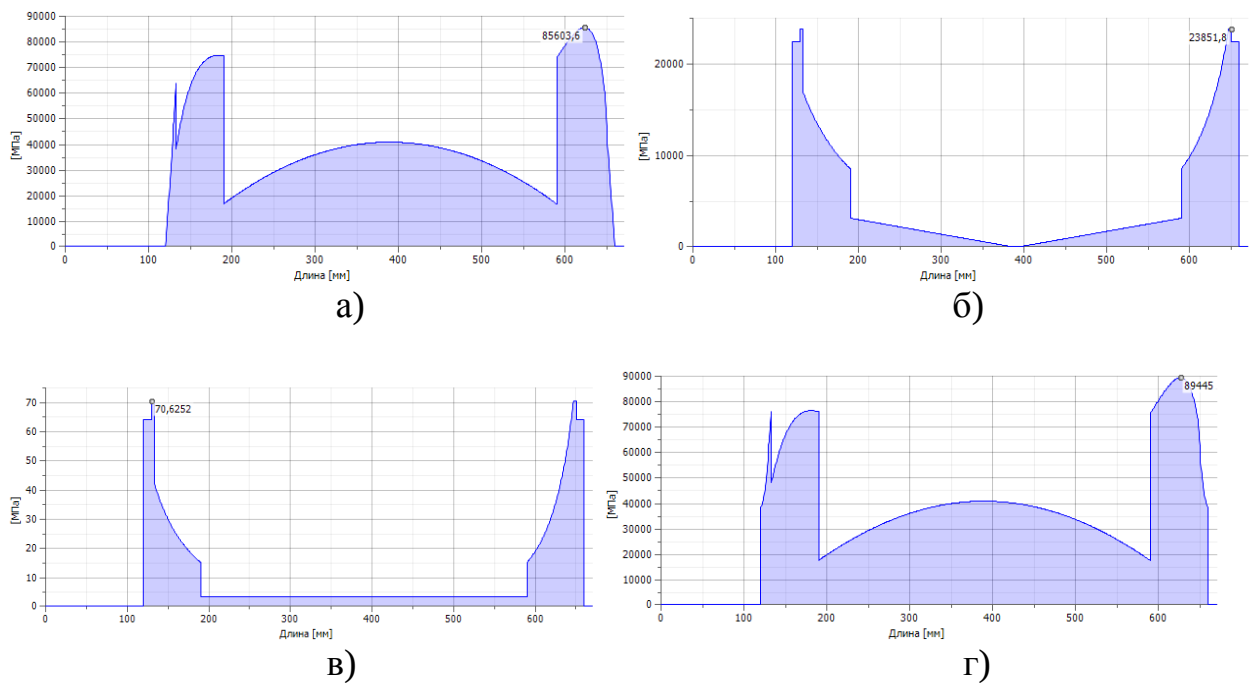


Рисунок 3.1.3 - Картина распределения эквивалентных напряжений в валке

На рисунке 3.1.4 показаны эпюры соответствующим напряжениям полученные в программе Inventor.



а) напряжение при изгибе; б) напряжение сдвига; в) напряжение при кручении; г) приведенное напряжение

Рисунок 3.1.4 - Эпюры напряжений в валке

Проведенные исследования показали, что картина распределения суммарных перемещений в трех направлениях согласуется с деформированной формой валков. Максимальный прогиб $f_{\max} = 0,058397$ мм наблюдается в середине бочки валков (рисунок 3.1.5). Полученные значения прогиба соответствует параметрам валков по жесткости (суммарный изгиб допускаемые при холодной прокатке равняется $f = 0,05 \div 0,3$ мм). Под действием приложенных вертикальных сил валки прогибаются в направлении действия силы, а шейка валков упруго деформируются в этом же направлении, причем максимальное значение упругой деформации составляет для бочки валков 0,058397 мм, для шейки валков - 0,003599 мм. Соответствующая эпюра показана на рисунке 3.1.6.

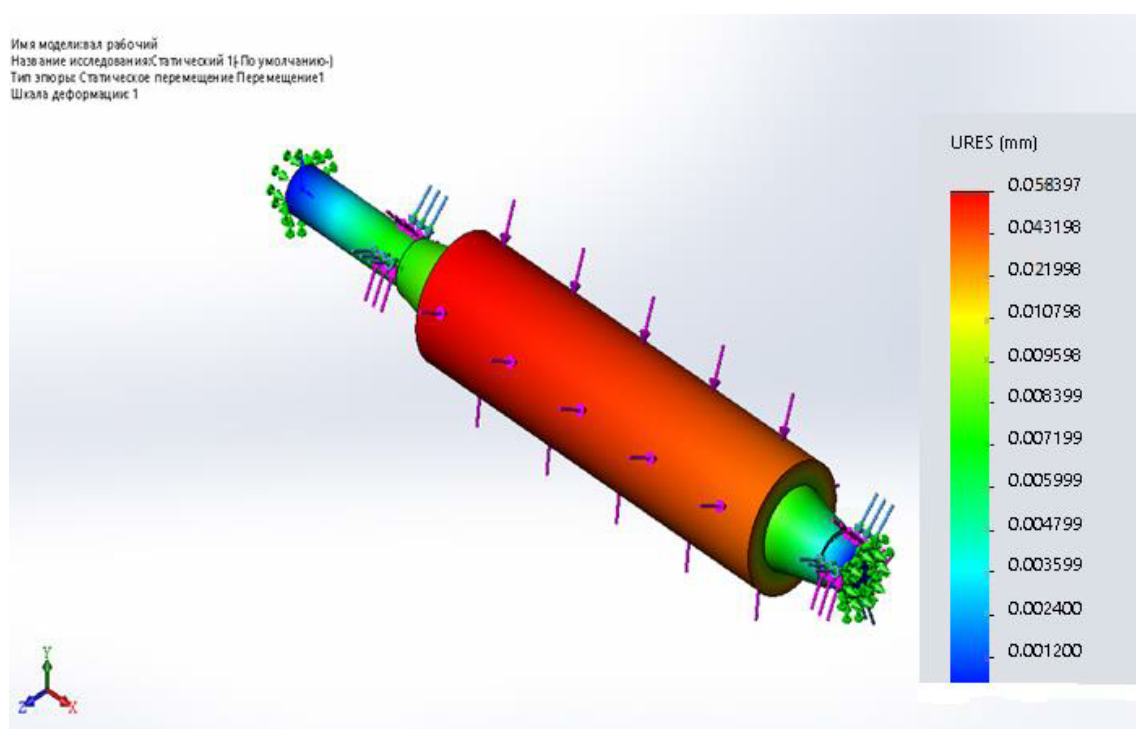


Рисунок 3.1.5 - Картина распределение суммарных перемещений валка

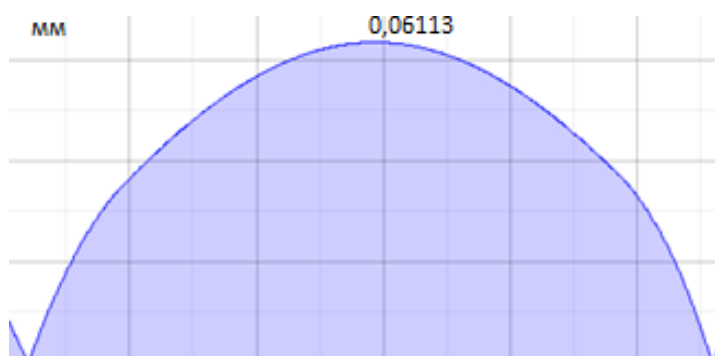


Рисунок 3.1.6 - Эпюра перемещений валка

3.2 Повышение прочности шейки валка

Проведенные аналитические расчеты и анализ напряжений в компьютерных программах показали, что на шейке валка недостаточно прочности. В связи с этим для того, чтобы ее повысить применим доступный нам способ для увеличения усталостной – увеличение размеров массы.

Примем, что диаметр шейки равен 55 мм, тогда по формулам 2.6, 2.7, 2.8, 2.11:

- максимальное напряжение изгиба

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{0,141 \cdot 0,0197}{0,4 \cdot 0,055^3} = 41,7 \text{ МПа};$$

- напряжение кручения

$$\tau = \frac{0,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2}{0,2 \cdot 0,055^3} = 53,55 \text{ МПа};$$

- максимальные эквивалентные напряжения

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{41,7^2 + 3 \cdot 53,55^2} = 101,7 \text{ МПа};$$

- в шейке валка

$$n_{\text{ш}} = \frac{830}{101,7} = 8,2 \text{ МПа}.$$

На представленной картине напряжений валка (рисунок 3.2.1) мы видим, что при измененных размерах валка эквивалентные напряжения в валке минимальны.

Таким образом, сделаем вывод, что при увеличении диаметра шейки валка статическая прочность на данном участке соответствует параметрам прочности.

Увеличив статическую прочность тем самым, мы увеличили работоспособность прокатного валка.

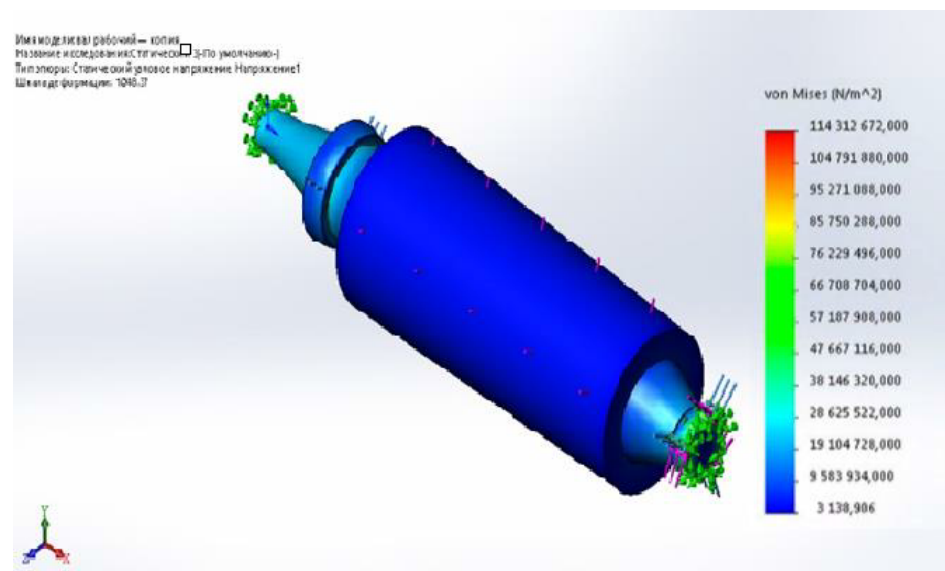


Рисунок 3.2.1 - Картина напружень валка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

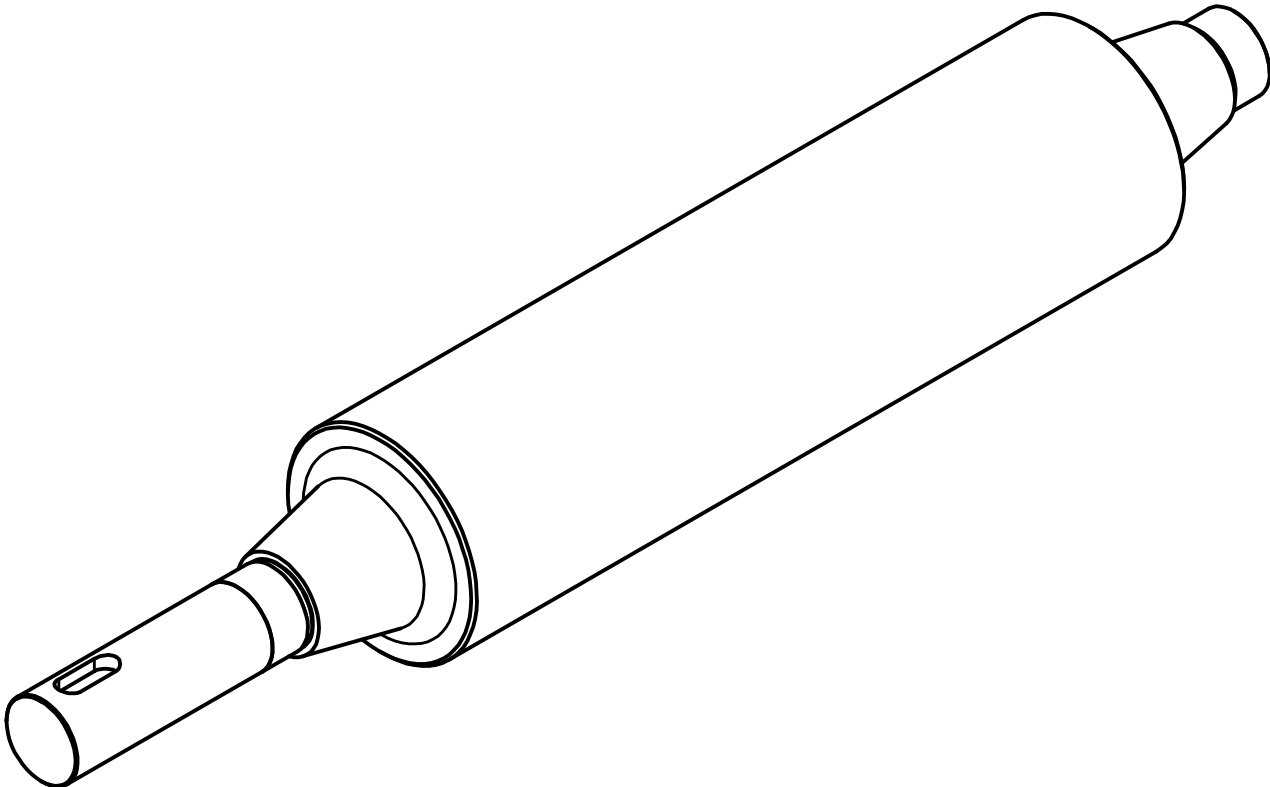
По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы: проведено ознакомление с конструкцией прокатного вала; рассмотрен вопрос дефектов вала.

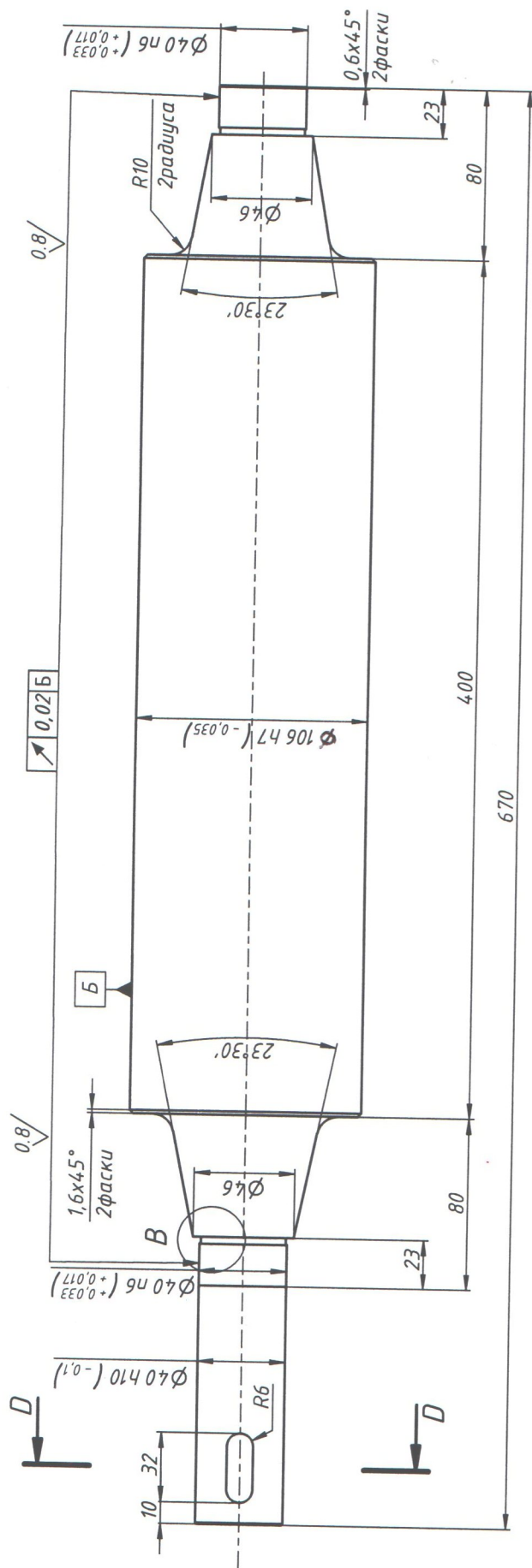
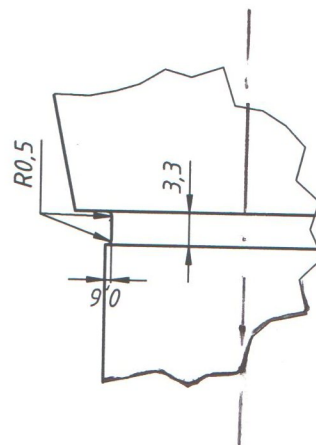
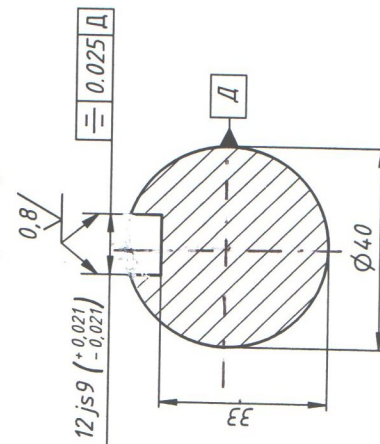
Были изучены эксплуатационные показатели вала, проанализированы методы их повышения, проведены расчеты на прочность и перемещение вала с выявлением его проблем. Произвели конечно - элементный расчет модели вала, получив визуальную картинку.

Итогом работы стало, то, что, увеличив размер диаметра шейки вала, затем проверив его с помощью КЭМ, мы увеличили его работоспособность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 <http://5fan.ru/wievjob.php?id=49499>
- 2 Безнос М.П. «Валки крупносортовых и рельсобалочных станов», Металлургия, 1966 г.
- 3 <http://metallichekiy-portal.ru/>
- 4 Петров В.С., Карманов А.И. Производство валков холодной прокатки. – М.: Машиностроение, 1978. – 205 с.
- 5 Олжабаев Р.О., Итыбаева, Г.Т., Касенов А.Ж. Повышение эксплуатационной стойкости валков прокатного стана. - Вестник наука и техника Казахстана №3, 2005г. - с.112 - с.118.
- 6 Зобнин А.Д. Технологические основы проектирования прокатных комплексов.- Учебное пособие, 2009. – 60с.

Перв. примен.		Справ. №		5B071200-2p										
Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата								
Инв. № подл.		Т. контр.		Нач. отд.		Н. контр.							Утв.	
Изм.		Лист		№ докум.		Подп.							Дата	
Разраб.		Кожедекова Ф.М.				02.05.2019								
Пров.		Орлова Е.П.												
3D-модель прокатного вала		Лит.		Масса		Масштаб								
				32,2		1:4								
Сталь 9X1 ISO3887		Лист		Листов		1								
Сатбаев Университет		Кафедра СМТМП												
Копировал		Формат А4												

 $B(2:1)$  $D-D(1:1)$ 

1. 57...62 HRCэ.
2. Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий H14, валов h14, остальных $\pm \frac{IT14}{2}$.

[illegible]

Инд.№ подл.	Подл. в дома	Взам. инд. №	Инд.№ дучл.	Подл. в дома
-------------	--------------	--------------	-------------	--------------

Сред. №	
Пер. пункт.	