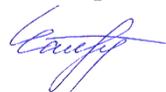


Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



САЛИХЯНОВА Екатерина Ильинична

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ
ШВЕЛЛЕРОВ**

2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
ШВАРЦ Данил Леонидович

Официальные оппоненты: **ФАСТЫКОВСКИЙ Андрей Ростиславович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и металловедения ЕВРАЗ ЗСМК Института металлургии и металловедения;
СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» института цветных металлов;
ТУЛУПОВ Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», проректор по научной и инновационной работе.

Защита состоится «05» октября 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04, по адресу 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=4962>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Большая часть производимого в мире металла подвергается обработке давлением, в частности прокатке. В таких важных отраслях промышленности, как строительство, вагоно-, судо-, автомобилестроение и др. одним из наиболее распространенных профилей проката является швеллер.

Известно, что центральным звеном технологии при прокатке того или иного профиля является калибровка прокатных валков. Поскольку именно калибровка во многом определяет эффективность технологического процесса, как с позиции получения качественного профиля, так и с позиции энерго- и металлосбережения, а в конечном итоге, и с позиций формирования себестоимости.

Для производства швеллера определенного номера и типа может быть спроектировано значительное количество различных вариантов калибровок валков, даже в пределах одного конкретного прокатного стана. Поэтому **актуальной** является задача выбора наилучшей, оптимальной калибровки.

Вопросу оптимизации калибровок валков посвящено большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных авторов, подавляющее большинство которых ограничены рассмотрением калибровок профилей простой формы. Кроме того, в мировой практике не выявлено методов оптимизации, направленных на одновременный или последовательный поиск двух составляющих оптимальности калибровки валков: поиск оптимальной схемы калибровки и поиск оптимального режима обжатый.

Именно поэтому, исследования, направленные на разработку математической модели проектирования и комплексной оптимизации калибровок прокатных валков сложных фасонных профилей, являются **актуальными**.

Степень разработанности темы. Все известные методы оптимизации калибровок валков для прокатки сортовых профилей, направлены на поиск либо оптимальной схемы калибровки, либо оптимального режима обжатый, реже встречаются работы по совместной оптимизации. При этом, как правило, постановка оптимизационной задачи сводится к достижению лишь одной частной цели оптимизации из множества желательных целей реальной практики.

Большее количество известных работ посвящено оптимизации режима обжатый. Калугина О. Б. предлагает оптимизировать калибровку простых сортовых профилей за счет оптимизации формы вытяжных калибров с целью энергосбережения. В работах С. А. Левандовского, О. В. Синицкого и Н. А. Ручинской предлагается оптимизировать форму калибров по

критерию неравномерности деформации. Оптимизации калибровок валков простых сортовых профилей по критерию энергоэффективности посвящены работы Д. И. Кинзина. Также автором предложены решения по оптимизации режима обжатий по критерию минимума работы деформации.

Вышесказанное позволяет сформулировать **цель работы**: разработать комплексную модель проектирования и оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров, позволяющую решать задачи многоцелевой оптимизации.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи**:

- установить предпочтительные цели оптимизации швеллерных калибровок;
- разработать критерии оптимальности для 2-х компонент калибровки: 1) схемы калибровки, 2) режима обжатий;
- сформировать пространства оптимизации указанных 2-х компонент;
- сформулировать целевые функции оптимальности этих 2-х компонент;
- разработать алгоритмы поиска: 1) оптимальной схемы калибровки и 2) оптимального режима обжатий;
- применить полученные разработки для оптимизации калибровки валков для прокатки конкретного швеллера на конкретном промышленном прокатном стане.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. На основе общей модели двухэтапной оптимизации калибровок прокатных валков предложена модель оптимизации калибровок валков для прокатки швеллеров.
2. Проведена и формализована классификация швеллерных калибров, позволившая сформировать "пространство швеллерных калибров", пригодное для создания программных продуктов как проектирования, так и оптимизации калибровки валков.
3. Классифицированы и формализованы основные типы и подтипы схем известных промышленных швеллерных калибровок. Выявлена универсальная блочная структурная схема любой швеллерной калибровки.
4. Используя теорию графов, выявлены связи швеллерных калибров, описывающие возможность последовательного применения калибров.
5. Разработана модель формирования множества схем калибровок, допустимых для конкретного прокатного стана, и составляющих

"пространство схем швеллерных калибровок" – первое пространство оптимизации.

6. Сформулирован новый принцип описания режима обжатий как точки n -мерного пространства обжатий в n проходах прокатки. Ограниченная совокупность таких точек является "пространством режимов обжатий" – вторым пространством оптимизации.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработан новый вид швеллерного калибра, обеспечивающий уменьшение неравномерности деформации.
2. Разработаны алгоритмы формирования возможных схем швеллерных калибровок и возможных режимов обжатий, пригодные для программной реализации.
3. Предложена модель многоцелевой оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров, адаптируемая к текущей технико-экономической ситуации конкретного производства с учетом предпочтений производителя.

Методология и методы исследования. Разработанная модель двухэтапной оптимизации швеллеров базируется на методах, используемых в теории систем и теории оптимального управления. Для выявления основополагающих характеристик швеллерного калибра выбран метод классификации. Возможность следования одного калибра вслед за другим в схеме калибровки установлена с помощью теории графов. Для "оцифровки" и формирования целевых функций схемы калибровки использовались методы экспертной оценки и ранжирования. Для поиска оптимума режима обжатий применены методы вычислительной математики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель оптимизации калибровок валков для прокатки швеллеров, включающая два последовательных этапа: сначала выбор оптимальной схемы калибровки, а затем, оптимизация распределения обжатий по проходам, т.е. оптимизация режима обжатий.
2. Универсальная блочная модель общей структуры швеллерных калибровок.
3. Формализованная классификация швеллерных калибров, принципы формирования пространства швеллерных калибров и оцифровки формы калибра.
4. Структура критерия оптимальности схемы швеллерной калибровки.
5. Генератор формирования пространства виртуальных схем швеллерных калибровок как первого пространства оптимизации.

6. Структура и принципы расчета многокритериальной целевой функции критерия оптимальности схемы калибровки.
7. Структура критерия оптимальности режима обжатий.
8. Представление режима обжатий как точки n -мерного пространства обжатий в n проходах.
9. Структура и принципы расчета многокритериальной целевой функции критерия оптимальности режима обжатий.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается применением фундаментальных положений теории ОМД, теории систем, теории оптимального управления, теории графов, методов вычислительной математики.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XI Международный Конгресс прокатчиков, г. Магнитогорск, МОО «Объединение прокатчиков», 2017; XVII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых, г. Екатеринбург, Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2017; III Международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice», г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2018; XIX Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых, г. Екатеринбург, Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2018; VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием «ТИМ'2019», г. Екатеринбург, ООО АМК «День РА», 2019; IV Международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice», г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2019; Юбилейная международная научно-практическая конференция «Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний», Казахстан, г. Рудный, Рудненский индустриальный институт, 2019; V Международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice», г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2020; VI Международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice», г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2022.

Публикации. Основное содержание исследования изложено в 15 научных статьях, из них 5, опубликованы в ведущих рецензируемых научных

журналах, рекомендуемых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, входящих в международную базу данных Scopus.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90246.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, установлены ее цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор технических литературных данных, описывающий особенности калибровки прокатных валков для производства швеллеров, представлены методы расчета энергосиловых параметров при сортовой прокатке, а также описаны различные методы оптимизации калибровки прокатных валков. На основе литературно-патентного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию основных положений универсальной «Концепции двухэтапной оптимизации калибровки».

«Концепция двухэтапной оптимизации калибровки» основывается на представлении калибровки валков как технологической системы, предназначенной для производства заданного профиля проката из заданной заготовки на конкретном прокатном стане. Согласно теории систем и теории оптимального управления, система считается оптимальной в том случае, когда обладает двумя наилучшими компонентами: оптимальной структурой и оптимальным управлением. Для калибровки валков структурой системы является схема калибровки (определенная последовательность применения определенных форм, типов калибров), а управлениями выступает режим обжатий (распределение обжатий по проходам). Следовательно, поиски оптимальной схемы калибровки и оптимального режима обжатий являются определяющими при нахождении оптимальной калибровки валков.

«Концепция двухэтапной оптимизации калибровки» состоит в использовании двух последовательных этапов: 1) Поиск оптимальной схемы калибровки. 2) Поиск оптимального режима обжатий (рисунок 1).

В реальных условиях сортопрокатного производства имеется большое множество «Целей оптимизации» (рисунок 1, модуль 1), которые могут варьироваться от простых (экономия энергии) до наиболее сложных (оптимизация механических свойств). «Концепция» предполагает применение 2-х многоцелевых критериев оптимальности на каждой стадии оптимизации, что существенно расширяет возможности разной формулировки целевых функций оптимальности.

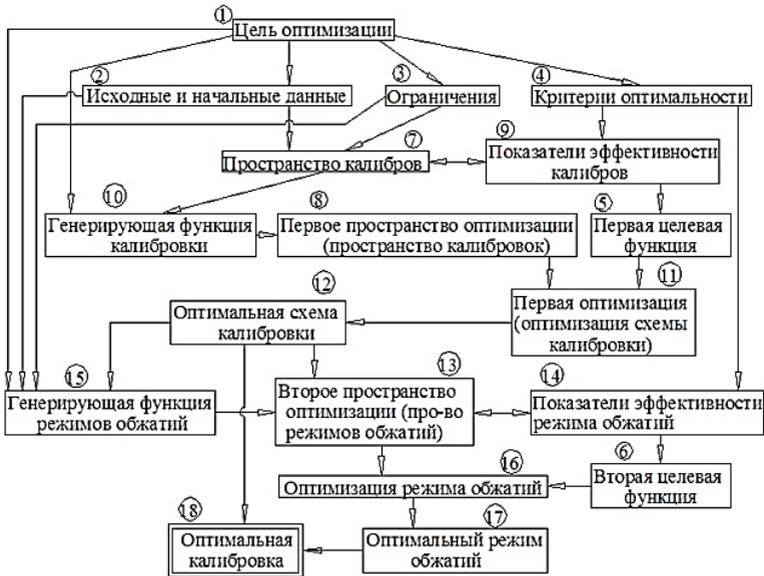


Рисунок 1 – Схема "Концепции двухэтапной оптимизации"

Модули 2 и 3 «Исходные и начальные данные» и «Ограничения» (рисунок 1) включают технические требования к прокатному стану, рабочим клетям и т. д., а также экономические, организационные и другие условия и ограничения.

Под понятием «Критерии оптимальности» (модуль 4) подразумевается четко сформулированный способ получения лучшего решения, включающий установленное пространство оптимизации, однозначно сформулированную целевую функцию и правило определения оптимального значения.

«Целевая функция» (модуль 5,6) для каждого критерия оптимальности является функциональной зависимостью от «Показателей эффективности» (модули 9, 14), каждый из которых численно формализует отдельную, частную цель многоцелевой оптимизации.

«Пространство калибров» – это информационное пространство, включающее в себя все принципиально возможные варианты калибров, предназначенные для прокатки определенного профиля на известном прокатном стане (модуль 7). Наполнение пространства производят на основе анализа известных из технической литературы и заводской документации калибровок.

Для формирования уникальных схем калибровок из отдельных калибров, составляющих «Пространство калибров», используется алгоритм – «Генерирующая функция калибровки» (модуль 10). Главной задачей

алгоритма является преобразование пространства объектов (калибров), в пространство групп связанных объектов – схем калибровки.

Логический модуль "Пространство схем калибровок" или "Первое пространство оптимизации" (модуль 8) включает в себя всю совокупность различных виртуальных схем калибровок, полученных с помощью генерирующей функции схемы калибровки.

В модуле 11 "Оптимизация схемы калибровки" осуществляется решение первой оптимизационной задачи. Могут быть применены различные процедуры вычислительной математики в зависимости от конкретной формулировки целевой функции. Результат решения – "Оптимальная схема калибровки" (модуль 12).

С использованием оптимальной схемы калибровки, для получения заданного профиля из заданной заготовки, могут быть применены различные распределения обжатый по проходам, т.е. могут быть применены различные режимы обжатый, каждый (допустимый по ограничениям) из которых, является возможным (виртуальным) управлением системы. Для расчета таких виртуальных режимов обжатый предназначена "Генерирующая функция режимов обжатый" (модуль 15).

Совокупность всех возможных режимов обжатый составляет "Пространство режимов обжатый" или "Второе пространство оптимизации" (модуль 13). Размерность этого пространства определяется количеством проходов в калибровке n со степенью свободы $n-1$. Пространство режимов обжатый представляет собой ограниченную поверхность n -мерного гиперболоида, каждая точка которого представляет собой виртуальный режим обжатый. На рисунке 2, в качестве наглядного примера, представлено трехмерное пространство режимов обжатый.

В модуле 16 "Оптимизация режима обжатый" (рисунок 1) осуществляется решение второй оптимизационной задачи. Результат решения – "Оптимальный режим обжатый" (модуль 17).

Таким образом полученная калибровка будет обладать оптимальной структурой – оптимальной схемой калибровки и оптимальным управлением – оптимальным режимом обжатый, т. е. будет являться "Оптимальной калибровкой" (модуль 18).

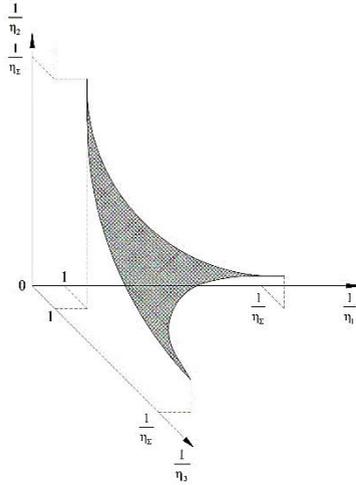


Рисунок 2 – Трехмерное пространство режимов обжатий

В третьей главе, на основе универсальной «Концепции двухэтапной оптимизации», разработана математическая модель проектирования и оптимизации калибровки прокатных валков для производства швеллеров. На рисунке 3 изображена схема первого этапа оптимизации поиск оптимальной схемы калибровки.

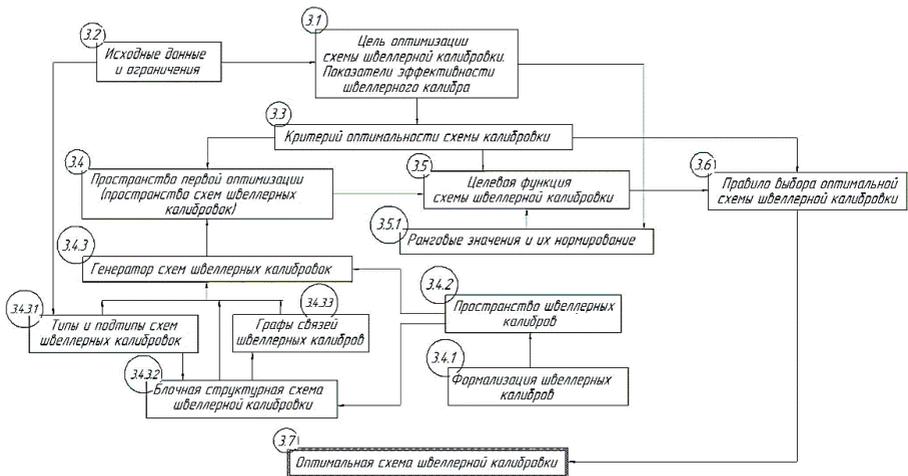


Рисунок 3 – Схема первого этапа оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров

Так как выбор оптимальной схемы калибровки является задачей многоцелевой оптимизации, использован "многоцелевой" критерий оптимальности. Для этого составлена комплексная целевая функция $Q_{ск}$ с

использованием частных показателей эффективности калибра g_i , позволяющая одновременно достигать максимально широкий спектр разноплановых целей.

Каждый из частных показателей эффективности g_i отражает одну из возможных целей, к достижению которой должна стремиться "идеальная калибровка". Исходя из самых широких представлений об эффективности производства швеллеров, в качестве таких величин были выбраны 14 показателей эффективности, каждому из которых присвоен ранг влияния a_i . Учесть все возможные на практике показатели эффективности калибра невозможно, поэтому, в каждом конкретном случае оптимизации калибровки, их список может быть либо расширен, либо сокращен.

Определена структура, исходные данные и сформулирована система ограничений швеллерной калибровки как по классу допустимых схем калибровок, так и по допустимым режимам обжатий.

Впервые проведена классификация и строгая формализация описания швеллерных калибров. На основе анализа действующих швеллерных калибровок валков, известных из технической литературы, было выделено 4 основных формообразующих характеристики калибров: С – Вид стенки; Д – Вид действительных фланцев; Л – Вид ложных фланцев; Р – Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр. Выделены уровни варьирования каждой характеристики.

"Оцифровка" показателей эффективности g_i осуществляется по каждому уровню варьирования характеристики с помощью методов ранжирования и экспертной оценки. В таблице 1 приведен пример назначения рангов и их нормирование по характеристике С – Вид стенки.

Таблица 1 – Ранги калибров R_{ijn} и их нормирование по характеристике классификации С – "Вид стенки"

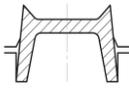
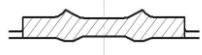
i	Показатель эффективности	Ранг влияния a_i	Уровень n характеристики классификации С				$\sum_{i=1}^n R_{iCn}$
			прямая	вырезная	изогнутая	волнистая	
							
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Стабильность формоизменения	0,3	3 (0,375)	1 (0,125)	2 (0,250)	2 (0,250)	8

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Образование дефектов	0,1	3 (0,375)	1 (0,125)	2 (0,250)	2 (0,250)	8
3	Износ	0,1	3 (0,375)	1 (0,125)	2 (0,250)	2 (0,250)	8
4	Сложность настройки	0,03	2 (0,333)	2 (0,333)	1 (0,167)	1 (0,167)	6
5	Переточка валков	0,1	2 (0,286)	1 (0,143)	2 (0,286)	2 (0,286)	7
6	Использование бочки валков	0,05	1 (0,111)	3 (0,333)	2 (0,222)	3 (0,333)	9
7	Начальный диаметр валков	0,03	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	4
8	Глубина вреза валков	0,1	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	4
9	Валковая арматура	0,02	2 (0,333)	2 (0,333)	1 (0,167)	1 (0,167)	6
10	Ширина буртов	0,04	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	4
11	Усилие прокатки	0,05	2 (0,222)	1 (0,111)	3 (0,333)	3 (0,333)	9
12	Воздействие на валковую арматуру	0,03	2 (0,222)	1 (0,111)	3 (0,333)	3 (0,333)	9
13	Мощность прокатки	0,05	2 (0,222)	1 (0,111)	3 (0,333)	3 (0,333)	9
14	Расход воды	0	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	1 (0,250)	4
Примечание – В скобках указано нормированное значение показателя эффективности по рассматриваемой характеристике							

Путем комбинирования различных допустимых уровней этих характеристик сформировано «Пространство швеллерных калибров», включающее в себя 204 реальных схемы швеллерных калибров. Это пространство представлено в виде четырехмерной «Матрицы швеллерных калибров», малая часть которой показана в таблице 2.

Таблица 2 – Фрагмент «Матрицы швеллерных калибров»

№ калибра	Уровень характеристики калибра				Код калибра	Пример калибра
	С	Д	Л	Р		
1	Прямая	Прямые с малым уклоном	Треугольные	Открытый	1111	
41	Прямая	Без уклона	Треугольные	Полузакрытый	1412	
62	Вырезная	Прямые с малым уклоном	Трапециевидные	Полузакрытый	2122	
Примечание – Всего в матрицу швеллерных калибров входит 204 реальных схемы швеллерных калибров						

При формировании пространства калибров был предложен новый, не известный из литературы и практики, тип швеллерного калибра – с двойным уклоном действительных фланцев (рисунок 4).

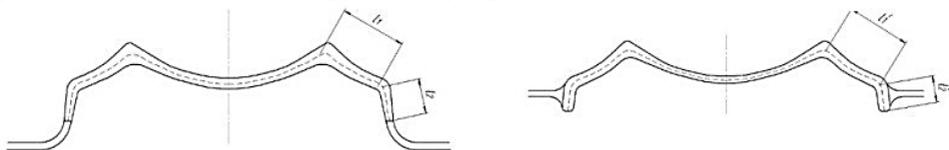


Рисунок 4 – Швеллерный калибр с двойным уклоном действительных фланцев

Выделено 4 типа схем швеллерных калибровок (ТСК): ТСК 1 – прямополочная; ТСК 2 – развернутая; ТСК 3 – по способу сгибания; ТСК 4 – комбинированная.

Установлено, что все схемы швеллерных калибровок валков можно представить в виде принципиальной однотипной блочной структуры, состоящей из 7 строго последовательных блоков, структура и набор которых зависит от ТСК.

Для однозначного определения возможного порядка использования калибров в пределах одного блока, а также при переходе швеллерной полосы от калибра одного блока к калибру другого, с помощью "Теории графов", разработано 8 графов связей швеллерных калибров. Проанализировав все переходы внутри каждого блока, а также между ними (33864 перехода), получено 4025 реально возможных переходов, что и отражено в разработанных графах связей. Так как размерности графов достаточно

большие, в таблице 3 представлен малый фрагмент наиболее обширного графа связей ГЗ "Формообразующие калибры".

Таблица 3 – Фрагмент графа ГЗ "Формообразующие калибры"

Код калибра	j	1114	1115	1124	1125	1214	1215	1224	1225	...
i	Калибр									...
1114		1	1	0	0	1	1	0	0	...
1115		0	1	0	0	0	1	0	0	...
1124		0	0	1	1	0	0	1	1	...
...

На основе указанных выше разработок (пространство швеллерных калибров, ТСК, блочной структуры швеллерной схемы калибровки, графов связей), с помощью специально созданного "Генератора схем швеллерных калибровок" сформировано первое пространство оптимизации – "Пространство схем швеллерных калибровок".

Расчет целевой функции схемы калибровки осуществляется согласно схеме, представленной на рисунке 5. Схема калибровки валков с наибольшим значением целевой функции и будет считаться оптимальной ($Q_{ск} \rightarrow \max$).

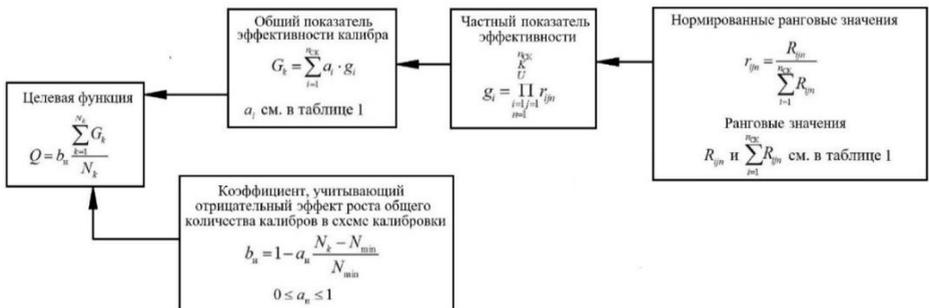


Рисунок 5 – Блок-схема расчета значения целевой функции критерия оптимальности схемы швеллерной калибровки

На рисунке 6 изображена схема второго этапа оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров – поиск оптимального режима обжатий.

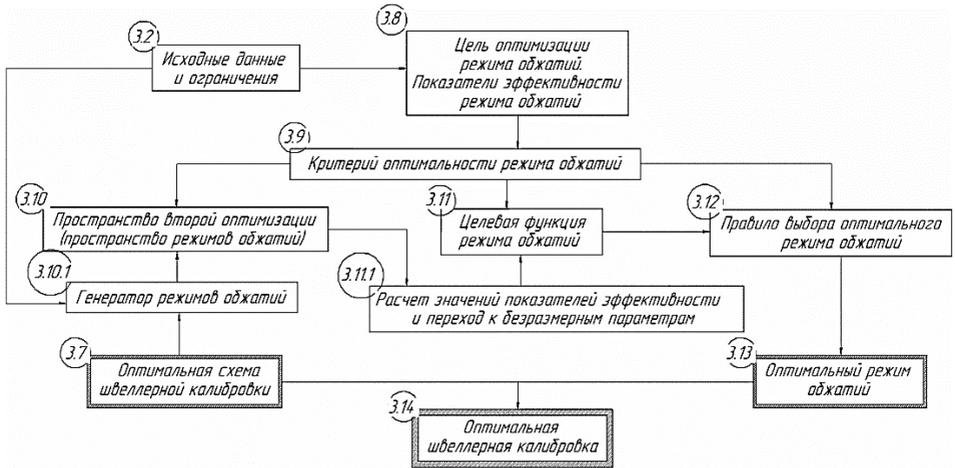


Рисунок 6 – Схема первого этапа оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров

Используется комплексная многокритериальная целевая функция Q_{po} . Как и при выборе показателей эффективности схемы калибровки g_i , так и при выборе показателей эффективности режима обжатий f_j учесть все показатели эффективности невозможно. В работе использовано 5 показателей эффективности режима обжатий f_j (таблица 4), по мнению автора, важнейших, но их список может быть, как расширен, так и сокращен. Каждому показателю эффективности f_j присвоен знак влияния e_j , а величина самого коэффициента влияния e_j назначается таким образом,

$$\text{чтобы } \sum_{j=1}^{n_{po}} e_j = 1.$$

Таблица 4 – Показатели эффективности калибров f_i входящие в целевую функцию критерия оптимальности режимов обжатий

№	Наименование показателя	Целевое значение	Знаки коэффициентов влияния, e_j
1	2	3	4
1	Коэффициент загрузки рабочей клетки по усилию прокатки, f_p	Min	+

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
2	Коэффициент загрузки электродвигателя по крутящему моменту, f_M	Min	+
3	Производительность прокатного стана, f_{II}	Max	-
4	Расход электроэнергии на весь цикл прокатки, f_W	Min	+
5	Температура конца прокатки, f_T	Max	-

В качестве генератора режима обжатий выбран метод выпуклого программирования – метод Гаусса– Зейделя.

Расчет целевой функции критерия оптимальности режима обжатий, значений частных показателей эффективности осуществляется согласно схеме на рисунке 7.



Рисунок 7 – Блок-схема расчета значения целевой функции критерия оптимальности режима обжатий

Сформирован алгоритм поиска оптимального режима обжатий. Режим обжатий с наименьшим значением целевой функции будет считаться оптимальным ($Q_{po} \rightarrow \min$).

Для осуществления полноценной комплексной оптимизации (проектирования) калибровок необходима программная реализация разработанных алгоритмов. Однако разработанная модель и методика поиска оптимальной калибровки позволяют сравнить несколько спроектированных калибровок между собой, т.е. определить если не оптимальную, то рациональную.

В четвертой главе представлено практическое применение разработанной модели на примере поиска рациональной калибровки для прокатки швеллера №24У, производимого на стане 800 в рельсобалочном цехе (РБЦ) АО «ЕВРАЗ НТМК» с использованием прямопалочной калибровки (далее по тексту "заводская" технология, калибровка). В

качестве заготовки используют непрерывнолитую заготовку из стали марки СтЗкп длиной 4900 м, сечением 250×250 мм, нагреваемую до 1260 °С.

Прокатка швеллера по заводской технологии осуществляется за 13 проходов. В калибровке использованы следующие калибры с кодами: ящичный калибр, открытый разрезной калибр (2121), 6 прямопалочных формообразующих калибров (3224), 2 контрольных калибра (3222) и закрытый снизу чистовой калибр с прогибом стенки (1134).

С целью сопоставительного анализа произведен расчет характеристик заводской калибровки. Получены следующие значения целевых функций:

- критерия оптимальности схемы калибровки $Q_{ск} = 0,0027$,
- критерия оптимальности режима обжатий $Q_{ро} = -0,0534$.

Разработана новая калибровка валков с использованием развернутой схемы (ТСК 2) с применением контрольных калибров нового типа – с двойным уклоном полок (рисунок 4). Для наилучшей сопоставимости с заводской, в новой схеме калибровки сохранено число калибров, равное 10, использованы та же заготовка, температура ее нагрева и сохранены прочие технологические аспекты. Швеллер 24У получен за 12 проходов с использованием 2-х ящичных калибров. В новой схеме калибровки присутствуют по одному калибру с кодами 1134 (чистовой), 3512 (контрольный), 3514 (формообразующий) и 2214 (разрезной), по 2 калибра с кодами 3314 (формообразующий) и 3313 (формообразующий).

Значение целевой функции критерия оптимальности новой схемы калибровки составляет: $Q_{ск} = 0,0041$ (что значительно лучше этого же показателя для заводской калибровки $Q_{ск} = 0,0027$).

Для поиска оптимального режима обжатий в качестве основной деформационной характеристики используется коэффициент обжатия по стенке швеллера $\frac{1}{\eta_i}$, наилучшее распределение которого по проходам обеспечивает получение оптимального значения целевой функции 2-го критерия оптимальности.

В программе Microsoft Excel сформирована конструктивная модель расчета, позволяющая осуществлять одновременный расчет размеров калибров и энергосиловых параметров прокатки для каждого режима обжатий входящего в пространство режимов обжатий. Модель позволяет рассчитывать значения частных и общих показателей эффективности, а также значение целевой функции режима обжатий $Q_{ро}$.

С использованием этой конструктивной модели для новой схемы калибровки рассчитаны 6 вариантов оптимальных режимов обжатий: в 5-ти из них один из показателей эффективности f_j выбран в качестве главной цели оптимизации (для него коэффициент влияния $e_j = 0,6$, а для остальных $e_j = 0,1$) и в одном варианте оптимизации влияние показателей

эффективности принята одинаковой (коэффициент влияния каждого из пяти f_j одинаков $e_j = 0,2$). Такая многовариантность позволяет более обосновано подойти к выбору главной цели (или к отказу от принятия таковой) при разработке оптимальной калибровки для промышленного использования.

В каждом варианте оптимизации полученное значение целевой функции новой калибровки $Q_{ро.новой}$ значительно лучше, значения целевой функции заводской калибровки $Q_{ро.зав.}$.

В качестве примера, произведена детальная проработка для IV варианта оптимизации (с одинаковой влиятельностью f_j), т.к. этот вариант является наиболее универсальным. Для этого варианта значение целевой функции режима обжатий: $Q_{ро} = -0,2889$ (что значительно лучше этого же показателя для заводской калибровки $Q_{ро} = -0,0534$).

Размеры калибров и основные характеристики формоизменения были получены во время поиска оптимального режима обжатий. На их основе построена рациональная рабочая калибровка для прокатки швеллера 24У на РБС 800 АО «ЕВРАЗ НТМК», схема которой показана на рисунке 8. Разработанная калибровка валков передана на АО «ЕВРАЗ НТМК», что подтверждено актом использования результатов диссертационной работы.

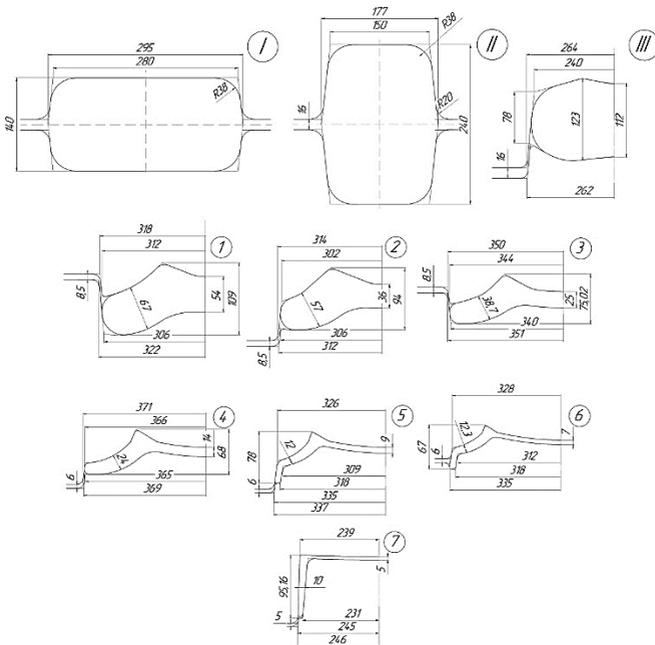


Рисунок 8 – Схема рациональной развернутой калибровки валков для прокатки швеллера №24У РБС АО «ЕВРАЗ НТМК»

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты исследования заключаются в следующем.

1. Разработана модель поиска оптимальной калибровки валков для прокатки любого профиля швеллерной формы на любом прокатном стане. Идеологической основой модели является представление калибровки как технологической системы с возможностями изменения структуры (схемы калибровки) и управлений (распределения обжатий по проходам). Для упрощения процедуры оптимизации, предложено производить оптимизацию последовательно, в два этапа, сначала производя поиск оптимальной схемы калибровки, а затем, поиск оптимального режима обжатий. При этом возникает возможность использования двух многоцелевых критериев оптимальности. Модель детально проработана и доведена до рабочих алгоритмов. При разработке модели выполнено следующее.

1.1 Сформирован критерий оптимальности схемы калибровки (1-й критерий), использующий многоцелевую функцию. Для ее формирования выделено 14 показателей эффективности, каждый из которых отражает одну из возможных целей оптимизации, присущих современному сортопрокатному производству (список показателей может быть, как сокращен, так и расширен).

1.2 Сформировано пространство швеллерных калибров, включающее в себя все известные из литературы и практики и вновь разработанные виды швеллерных калибров (всего 204 калибра).

1.3. С помощью разработанного генератора схемы калибровки и пространства швеллерных калибров удается сформировать первое пространство оптимизации – пространство схем швеллерных калибровок.

1.4. Разработан алгоритм поиска значения целевой функции для каждой сгенерированной схемы калибровки, входящей в данное пространство. Сформулировано правило выбора оптимальной схемы калибровки.

1.5. Сформирован критерий оптимальности режимов обжатий (2-й критерий).

1.6. Предложен новый способ представления режима обжатий как точки непрерывного ограниченного n -мерного пространства обжатий в n проходах. Это пространство содержит в себе все виртуальные режимы обжатий и является пространством второй оптимизации.

1.7. Предложен принцип формирования целевой функции критерия оптимальности, интегрирующей частные показатели эффективности режима обжатий. Выделено 5 частных показателей эффективности режима обжатий (список показателей может быть, как сокращен, так и расширен).

1.8. Для поиска оптимального режима обжатий, обеспечивающего экстремальное значение целевой функции, применен численный шаговый алгоритм.

2. Разработана новая рациональная калибровка валков для прокатки швеллера 24У на стане 800 РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК», как альтернатива используемой прямополочной калибровки, отличающаяся как более совершенной схемой калибровки (по рассмотренному комплексному критерию оптимальности схемы калибровки), так и лучшими характеристиками режима обжатий (по рассмотренному комплексному критерию оптимальности режима обжатий).

Использование новой калибровки, позволит:

- сократить затраты электроэнергии на производство 1 тонны металла в 2,3 раза;
- увеличить производительность стана при производстве швеллера в 1,8 раз;
- увеличить температуру конца прокатки на 71°С, что дает возможность уменьшить температуру нагрева заготовки, позволит снизить затраты на топливо для ее нагрева и снизит вероятность возникновения дефектов;
- увеличить срок эксплуатации валков за счет уменьшения глубины вреза калибров в валки и уменьшения съема металла при переточке валков, благодаря развернутой форме калибров;
- снизить неравномерность деформации за счет прямого обжатия полок швеллера в развернутых калибрах.

Созданную модель и алгоритмы рекомендуется использовать при разработке новых и совершенствовании действующих калибровок прокатных валков для производства швеллеров и аналогичных профилей швеллерной формы. Модель и алгоритмы сформированы таким образом, чтобы они могли использоваться для дальнейшего создания компьютерной программы оптимизации, которая позволит обрабатывать большие массивы данных и выдавать наилучший оптимальный результат.

Перспективы дальнейших исследований связаны с уточнением конструктивной модели прокатки швеллеров и разработкой моделей оптимизации для других сортопрокатных профилей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 1. Общие положения / Д. Л.

Шварц, А. М. Михайленко, **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)** // Черные металлы. – 2019. – № 9. – С. 4–8; 0.7 п.л. / 0.4 п.л.

Ustinova, E. I. (Salikhyanova, E. I.). Optimization of roll calibrations for beam channel rolling. Part 1. General regulations / D. L. Shvarts, A. M. Mikhaylenko, **E. I. Ustinova (E. I. Salikhyanova)** // Chernye Metally. – 2019. – № 9. – P. 4–8. (Scopus)

2. Ustinova, E. I. (Salikhyanova, E. I.). Method of optimization of roll calibration for channels. Groove space / D. L. Schwartz, A. M. Mikhailenko, **E. I. Ustinova (E. I. Salikhyanova)** // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. vol. 55, 3. pp. 657–665; 0.6 п.л. / 0.3 п.л. (Scopus)

3. Ustinova, E. I. (Salikhyanova, E. I.). Optimization of roll calibration for flange shape rolling. Groove space / D. L. Shvarts, A. M. Mikhaylenko, **E. I. Ustinova (E. I. Salikhyanova)** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 13 November 2020, Vol. 966, Issue 1, No art. 012136; 0.3 п.л. / 0.2 п.л. (Scopus)

4. Салихянова, Е. И. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 2. Пространство калибров / Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, **Е. И. Салихянова** // Черные металлы. – 2022. – № 4. – С. 27–33; 0.7 п.л. / 0.4 п.л.

Salikhyanova, E. I. Optimization of roll calibrations for beam channel rolling. Part 2. Space of channel gauges / D. L. Shvarts, A. M. Mikhaylenko, **E. I. Salikhyanova** // Chernye Metally. – 2022. – № 4. – С. 27–33. (Scopus)

5. Салихянова, Е. И. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 3. Пространство схем швеллерных калибров / Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, **Е. И. Салихянова** // Черные металлы. – 2022. – № 7. – С. 16–21; 0.4 п.л. / 0.2 п.л.

Salikhyanova, E. I. Optimization of roll calibrations for beam channel rolling. Part 3. Space of channel grooves schemes / D. L. Shvarts, A. M. Mikhaylenko, **E. I. Salikhyanova** // Chernye Metally. – 2022. – № 7. – С. 16–21. (Scopus)

Другие публикации:

6. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Оптимизационная модель и пространство калибров / А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц, **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)** // XI международный конгресс прокатчиков (Магнитогорск, 9–11 октября 2017 г.) / МОО «Объединение прокатчиков». – Магнитогорск, 2017. – С. 280–291; 0.09 п.л. / 0.05 п.л.

7. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Выбор оптимальной калибровки прокатных валков с целью улучшения структуры готового швеллера / **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)**, А. М. Михайленко, Д. Л.

Шварц // XVII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых (Екатеринбург, 21–23 ноября 2017) / Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2017. – С. 660–664; 0.19 п.л. / 0.11 п.л.

8. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Выбор оптимальной схемы калибровки валков для прокатки швеллеров / **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)**, А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // III международная молодежная научно-практическая конференция Magnitogorsk Rolling Practice (Магнитогорск, 5–8 июня 2018 г.) / Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2018. – С. 52–54; 0.09 п.л. / 0.05 п.л.

9. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Оптимизация схемы деформации металла при прокатке швеллеров / **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)**, А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // XIX Международная научно-техническая Уральской школа-семинар металлургов-молодых ученых (Екатеринбург, 19–23 ноября 2018 г.) / Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2018. – С. 505–509; 0.18 п.л. / 0.11 п.л.

10. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Выбор оптимальной схемы калибровки валков, как первого этапа оптимизации / **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)**, А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018. – №1. С. 72–82; 0.62 п.л. / 0.32 п.л.

11. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Модуль НСИ проектирования калибровки валков швеллера / И. О. Гелеверя, С. П. Куделин, **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)** // VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2019) с международным участием (Екатеринбург, 16–17 мая 2019 г.) / ООО АМК «День РА». – Екатеринбург, 2019. С 221–225; 0.14 п.л. / 0.07 п.л.

12. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Разработка блок-схемы концепции двухэтапной оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров / **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)**, А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // IV международная молодежная научно-практическая конференция Magnitogorsk Rolling Practice (Магнитогорск, 4–8 июня 2019) / Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2019. – С. 110–112; 0.09 п.л. / 0.06 п.л.

13. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Метод оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров. Пространство калибров / **Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова)**, Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко // Международная научно-практическая конференция "Современный инновации в области науки, техники и интеграции знаний" (Казахстан,

Рудный, 17–18 октября 2019 г.) / Рудненский индустриальный институт. – Рудный, 2019. – С. 497–509; 0.67 п.л. / 0.35 п.л.

14. Ustinova, E. I. (Salikhyanova, E. I.). Modeling of a new method of rolling channels in the deform software package / **E. I. Ustinova (E. I. Salikhyanova)**, D. L. Shvarts, A. M. Mikhaylenko // V International Youth Scientific and Technical Conference Magnitogorsk Rolling Practice (Magnitogorsk, 24–27 November 2020) / Magnitogorsk State Technical University G. I. Nosova. – Magnitogorsk, 2020. –P.69–71; 0.09 п.л. / 0.06 п.л.

15. Salikhyanova, E. I. Building a space of reduction modes for stage two optimization of roll calibration in steel channel production / **E. I. Salikhyanova**, D. L. Shvarts, A. M. Mikhaylenko // VI International Youth Scientific and Technical Conference Magnitogorsk Rolling Practice (Magnitogorsk, 31 May–04 June 2022) / Magnitogorsk State Technical University G. I. Nosova. – Magnitogorsk, 2022. – P.49–51; 0.09 п.л. / 0.06 п.л.