

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра «Обработка металлов давлением»

На правах рукописи

Салихьянова Екатерина Ильинична

Разработка математической модели проектирования и оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., доцент
Д. Л. Шварц

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ПАТЕНТНО-ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	12
1.1 Классификация швеллеров и требования, предъявляемые к ним.....	12
1.1.1 Швеллер общего назначения.....	14
1.1.2 Швеллеры специальные.....	15
1.1.3 Марки стали, используемые для изготовления швеллеров.....	16
1.2 Способы прокатки швеллеров.....	17
1.2.1 Балочный способ прокатки швеллеров.....	19
1.2.2 Корытный способ прокатки.....	21
1.2.3 Способ прокатки в калибрах с увеличенным уклоном действительных фланцев и изогнутой стенкой.....	23
1.2.4 Способ прокатки в развернутых калибрах.....	24
1.2.5 Прокатка по способу сгибания.....	27
1.2.6 Прокатка швеллеров в универсальных калибрах.....	29
1.3 Методы расчета формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке швеллеров.....	29
1.4 Модели оптимизации калибровок прокатных валков.....	36
1.4.1 Способы оптимизации схемы калибровки.....	39
1.4.2 Способы оптимизации режима обжатий.....	43
1.5 Выводы по главе 1.....	44
2 МОДЕЛЬ УНИВЕРСАЛЬНОЙ «КОНЦЕПЦИИ ДВУХЭТАПНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ».....	46
2.1 Первый этап оптимизации. Оптимизация схемы калибровки.....	49
2.2 Второй этап оптимизации. Оптимизация режима обжатий.....	54
2.3 Выводы по главе	61
3 МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ	62

3.1 Первый этап оптимизации. Постановка цель оптимизации схемы швеллерной калибровки валков	62
3.2 Исходные данные и ограничения.....	66
3.3 Критерий оптимальности схемы швеллерной калибровки валков.....	72
3.4 Пространство первой оптимизации. Пространство схем швеллерных калибровок.....	72
3.4.1 Формализация калибров, использующихся при прокатке швеллеров..	72
3.4.2 Пространство швеллерных калибров.....	80
3.4.3 Генератор схем швеллерных калибровок.....	82
3.4.3.1 Типы и подтипы схем швеллерных калибровок.....	83
3.4.3.2 Блочная структурная схема швеллерной калибровки.....	89
3.4.3.3 Графы связей швеллерных калибров.....	91
3.5 Целевая функция критерия оптимальности схемы швеллерной калибровки валков.....	94
3.5.1 Назначение ранговых значений и их нормирование.....	96
3.5.1.1 Обоснованный подход к назначению рангов.....	106
3.6 Правило выбора оптимальной схемы калибровки.....	109
3.7 Оптимальная схема швеллерной калибровки.....	109
3.8 Второй этап оптимизации. Постановка цели оптимизации режима обжатий.....	110
3.9 Критерий оптимальности режима обжатий.....	113
3.10 Пространство второй оптимизации. Пространство режимов обжатий.....	113
3.10.1 Генератор режимов обжатий.....	113
3.11 Целевая функция режима обжатий.....	114
3.11.1 Расчет частных показателей эффективности	115
3.12 Правило и процедура выбора оптимального режима обжатий.....	117
3.13 Оптимальный режим обжатий.....	119
3.14 Выводы по главе.....	120

4 ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРА 24У В УСЛОВИЯХ РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК».....	122
4.1 Конструктивная модель процесса прокатки швеллеров	122
4.1.1 Модель расчета размеров калибров и формоизменения в них.....	123
4.1.2 Модель расчета энергосиловых параметров прокатки.....	125
4.2 Совершенствование калибровки валков для прокатки швеллера 24У.....	125
4.2.1 Характеристика рельсобалочного стана 800.....	125
4.2.2 Расчет характеристик заводской калибровки швеллера 24У.....	128
4.2.2.1 Расчет значения целевой функции заводской схемы калибровки.....	129
4.2.2.2 Расчет значения целевой функции заводского режима обжатий..	135
4.2.3 Расчет рациональной калибровки для прокатки швеллера 24У.....	140
4.2.3.1 Поиск рациональной схемы калибровки.....	142
4.2.3.2 Оптимизация режима обжатий для новой схемы калибровки.....	147
4.3 Выводы по главе.....	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	170
Приложение А. Блок-схема алгоритма генерации отдельной виртуальной схемы швеллерной калибровки валков.....	187
Приложение Б. Разбиение схем швеллерных калибров на блоки в зависимости от типа схемы калибровки.....	188
Приложение В. Графы связей швеллерных калибров.....	194
Приложение Г. Монтажные схемы прокатных валков для швеллера 24У при прокатке в калибрах с увеличенным уклоном полок (заводская калибровка).....	201
Приложение Д. Рациональная развернутая калибровка валков для прокатки швеллера №24У на РБС ОАО «ЕВРАЗ НТМК».....	203

Приложение Е. Монтажные схемы прокатных валков для швеллера 24У при прокатке в развернутых калибрах (рациональная калибровка).....	208
Приложение Ж. Акт об использовании результатов диссертационной работы.....	212

ВВЕДЕНИЕ

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 главным 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.

Для производства швеллера определенного номера и типа может быть спроектировано значительное количество различных вариантов калибровок валков, даже в пределах одного конкретного прокатного стана. Поэтому встает вопрос выбора наилучшей – оптимальной калибровки из всего представленного множества калибровок или проектирования таковой, в случае, когда она отсутствует в данном множестве. Вопрос оптимизации калибровок валков является весьма актуальным и ему посвящено большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных авторов. Однако 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 обжатий. При этом поиску оптимальной калибровки для прокатки сложных сортовых профилей посвящено значительно меньшее количество работ, нежели профилям простой формы.

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 простых и сложных сортовых профилей, направлены на поиск либо оптимальной схемы калибровки, либо оптимального режима обжатий, а также постановка оптимизационной задачи сводится к

установке лишь одной цели оптимизации и соответствующего ей единственного критерия оптимальности.

Оптимизации схемы калибровки посвящено большее количество работ, чем оптимизации режима обжатий. Калугина О. Б. предлагает оптимизировать калибровку простых сортовых профилей за счет оптимизации формы вытяжных калибров с целью энергосбережения [1, 2]. В работах С. А. Левандовского, О. В. Сеницкого и Н. А. Ручинской рассматривается оптимизация формы калибров по критерию неравномерности деформации [3]. Оптимизации калибровок валков простых сортовых профилей по критерию энергоэффективности посвящены работы Д. И. Кинзина [4]. Также автором предложены решения по оптимизации режима обжатий по критерию минимума работы деформации [5].

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:

1. Установить предпочтительные цели оптимизации швеллерных калибровок.
2. Разработать критерии оптимальности для 2-х компонент калибровки: 1) схемы калибровки, 2) режима обжатий.
3. Сформировать пространства оптимизации указанных 2-х компонент.
4. Сформулировать целевые функции оптимальности этих 2-х компонент.
5. Разработать алгоритмы поиска: 1) оптимальной схемы калибровки и 2) оптимального режима обжатий.
6. 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 экономической ситуации и к предпочтениям производителя.

Методология и методы исследования. Разработанная универсальная "Концепция двухэтапной оптимизации" 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 формирования целевых функций использовались методы экспертной оценки и ранжирования.

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 структура швеллерных калибровок.
3. Классификация и формализация 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.

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 металловедов-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 металловедов-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 рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международную базу данных Scopus.

Частично работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90246.

1 ПАТЕНТНО-ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 Классификация швеллеров и требования, предъявляемые к ним

Швеллер является важным видом металлургической продукции и используется для придания жесткости и устойчивости конструкции. Благодаря его особой форме с ребрами жесткости, швеллер хорошо работает на изгиб и воспринимает продольные нагрузки, за счет чего увеличивается прочность и уменьшается масса конструкции. Стальной швеллер необходим как в капитальных зданиях для создания железобетонных конструкций, так и в строительстве быстровозводимых металлических зданий, таких как ангары, павильоны, автозаправки и т.п. Значительное количество различных швеллеров применяется и в машиностроении [6]. В России объем производства швеллеров составляет примерно четверть от всего потребления сортового металлопроката [7].

По мере развития промышленности и увеличения уровня урбанизации сортамент швеллеров постоянно совершенствовался, а способы его производства подвергались изменению и модернизации. Связано это с ростом требований к качеству готового изделия, с ростом конкуренции, а также со все возрастающей значимостью швеллерного профиля в строительстве, станкостроении, судостроении, машиностроении, вагоностроении и т.д. [7]. Профиль швеллера, в настоящее время, производят в соответствии с применяемыми в России межгосударственными ГОСТ, европейскими DIN, EN, американским ASTM и другими стандартами и техническими условиями.

Для производства швеллеров, отвечающих современным и перспективным требованиям качества, конкурентоспособности, эксплуатационной надежности и т.д. введены следующие стандарты:

- ГОСТ 8240–97 «Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент» [8];
- ГОСТ 19425–74 «Балки двутавровые и швеллеры стальные специальные. Сортамент» [9];

- ГОСТ 5267.1–90 «Швеллеры. Сортамент» [10];
- ГОСТ 21026–75 «Швеллеры стальные горячекатаные с отогнутой полкой для вагонеток. Сортамент [11].

В соответствии с вышеперечисленными ГОСТами швеллеры классифицируются по:

- *способу производства* на швеллеры стальные горячекатаные, швеллеры стальные гнутые равнополочные или неравнополочные;
- *по назначению* на швеллер широкого применения (ГОСТ 8240–97), швеллер специальный, предназначенный для автомобильной промышленности (ГОСТ 19425–74), на швеллер специальный для вагоностроения (ГОСТ 5267.1–90), на швеллер специальный для вагонеток (ГОСТ 21026–75);
- *по точности прокатки* изготавливают профили высокой точности (А), повышенной точности (Б) и обычной точности (В).

Стоит отметить, что несмотря на увеличение доли более дешевых гнутых швеллеров [12, 13] полный отказ от производства горячекатаных швеллеров вряд ли возможен [14]. Основное достоинство гнутых швеллеров – низкая цена. Их производят из рулонной листовой стали на машинах холодной гибки, что приводит к возникновению неоднородности свойств и возникновению остаточных напряжений в местах гибки. Кроме того, гнутый профиль невозможно изготовить с острыми углами при переходе от стенки к полке, а при стремлении уменьшить радиус закругления по этому углу возникают значительные остаточные напряжения изгиба, снижающие общую прочность профиля. Указанные особенности для ряда конструкций являются критичными. Горячекатаные швеллеры в отличие от гнутых, обладают однородной структурой металла по всему профилю и за счет различной толщины элементов, обладают большей удельной несущей способностью.

1.1.1 Швеллер общего назначения

Швеллер общего назначения производят по ГОСТ 8240–97 [8].

Выполняют в двух основных видах:

- *швеллер с уклоном внутренних граней полок*. Уклон граней составляет от 4 до 10% и маркируется буквой в зависимости от вида: У – с уклоном внутренних граней фланцев, С – специальные с уклоном внутренних граней фланцев (обладает способностью выдерживать высокие нагрузки при относительно небольшом весе);
- *швеллер с параллельными гранями полок*, маркируется буквой в зависимости от типа швеллера: П – с параллельными гранями; Э – экономичный с параллельными гранями (с меньшей толщиной стенки); Л – легкий с параллельными гранями (используется для неотчетственных построек, с целью облегчить металлоконструкцию без потерь прочности).

Швеллеры с уклоном внутренних граней полок применяются в качестве опорного элемента, а уклон полок позволяет уменьшить металлоемкость, повысить технологичность производства и более эффективно использовать несущую способность стали. Швеллер с параллельными гранями полок применяется при монтаже конструкций с креплениями (незаменим при наличии множества болтовых соединений).

Профиль швеллера состоит из трех основных элементов: шейки (стенки) и двух фланцев (полки). На рисунке 1.1 приведены основные (контролируемые) размеры швеллера по ГОСТ 8240–97 [8].

По ГОСТ 8240–97 предусмотрены швеллеры от № 5 до № 40. При этом: ширина полки b изменяется от 32 до 115 мм; толщина стенки s от 4,4 до 8 мм; толщина полки t от 7 до 13,5 мм; радиус внутреннего закругления R от 6 до 15 мм; радиус закругления полки r от 2,5 до 6 мм.

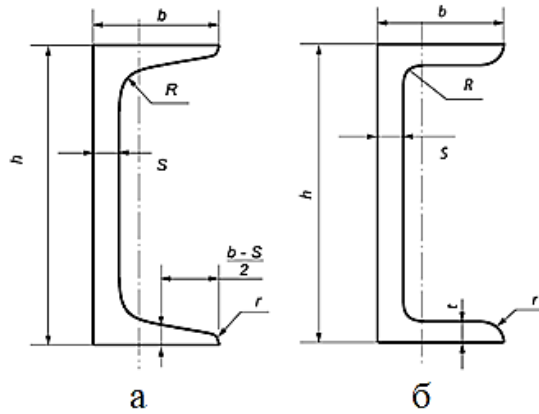


Рисунок 1.1 – Вид горячекатаного стального швеллера по ГОСТ 8240–97: а – с уклоном внутренних граней фланцев (У, С); б – с параллельными гранями полков (П, Э, Л) [8]

В зависимости от точности прокатки швеллер горячекатаный подразделяют на швеллер высокой точности («А») и обычной точности («В»).

Предельные отклонения контролируемых размеров швеллера от номинальных значений:

- высота стенки h : от $\pm 1,5$ до $\pm 3,0$;
- ширина фланца b : от $\pm 1,5$ до $\pm 3,0$;
- толщина фланца t : от $- 0,5$ до $- 1,0$;
- толщина стенки s : от $\pm 0,5$ до $\pm 0,7$.

1.1.2 Швеллеры специальные

Швеллеры специальные производят по ГОСТ 19425–74 [9], ГОСТ 5267.1–90 [10] и ГОСТ 21026–75 [11].

Швеллеры, производимые по этим ГОСТ и специальным ТУ, отличаются от швеллеров общего назначения размерами и полями допусков элементов профиля, формой и марками стали, применяемыми при их производстве.

По ГОСТ 19425–74 [9] изготавливают специальные швеллеры для автомобильной промышленности, по ГОСТ 5267.1–90 [10] швеллеры, предназначенные для вагоностроения и по ГОСТ 21026–75 [11]. Основные контролируемые размеры специальных швеллеров указаны на рисунке 1.2.

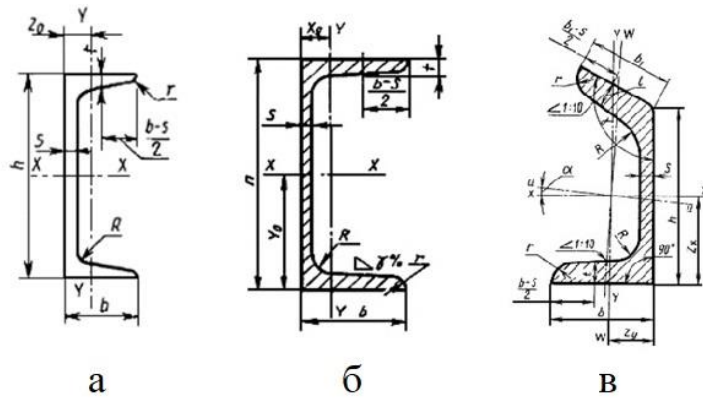


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение швеллера: а – для автомобильной промышленности по ГОСТ19425–74 [9]; б – для вагоностроения по ГОСТ 5267.1–90 [9]; в – для вагонеток по ГОСТ 21026-75 [11]

Кроме перечисленных профилей швеллеров, производимых по ГОСТ, производят большое количество профилей швеллерной формы по ТУ, приведенные, например, в группах профилей 29, 30 и 31 по классификации Н. Е. Скороходова и Б. М. Илюковича [18]. Широкий спектр производимых и используемых профилей швеллерной формы объясняется очень высокой экономичностью этих профилей – большая несущая способность при относительно малом весе погонного метра. Несомненно, спектр профилей швеллерной формы будет развиваться и в дальнейшем.

1.1.3 Марки стали используемые для изготовления швеллеров

Горячекатаный швеллер изготавливают из квадратной заготовки марки стали Ст3сп или Ст3кп по ГОСТ 380–2005 [15] и из низколегированных марок сталей 09Г2С, 10ХСНД и 15ХСНД по ГОСТ 19281–89 [16]. Стали марок 10ХСНД и 15ХСНД являются коррозионностойкими.

Механические свойства сталей при испытании на растяжение:

- для низколегированных марок сталей предел текучести σ_t варьируется в диапазоне от 265 до 440 Н/мм², временное сопротивление σ_b от 430 до 590 Н/мм², а относительное удлинение δ_5 от 21 до 19 % в зависимости от класса прочности и размеров раската по сечению [16];

- для углеродистой стали СтЗпс и СтЗсп временное сопротивление σ_b находится в диапазоне от 370 до 480 Н/мм², предел текучести от 255 до 205 Н/мм² и относительное удлинение δ_5 от 26 до 23 %, также в зависимости от размеров раската по сечению [17].

1.2 Способы прокатки швеллеров

Как известно, профиль швеллера имеет вид балки, с фланцами, расположенными с одной стороны стенки профиля (см. рисунок 1.1). Основной особенностью при прокатке швеллеров, является наличие ложных фланцев в черновых калибрах, благодаря которым обеспечивается выполнение острых наружных углов профиля. Указанные особенности во многом определили способы прокатки швеллеров и виды применяемых калибров (рисунок 1.3) [18–67].

К настоящему моменту в мировой практике по швеллерному производству разработано 5 основных способов прокатки швеллеров, отличающихся между собой формой черновых калибров:

- балочный способ прокатки;
- корытный способ прокатки;
- способ прокатки в калибрах с увеличенным уклоном действительных фланцев и изогнутой стенкой;
- способ прокатки в развернутых калибрах;
- прокатка по способу сгибания.

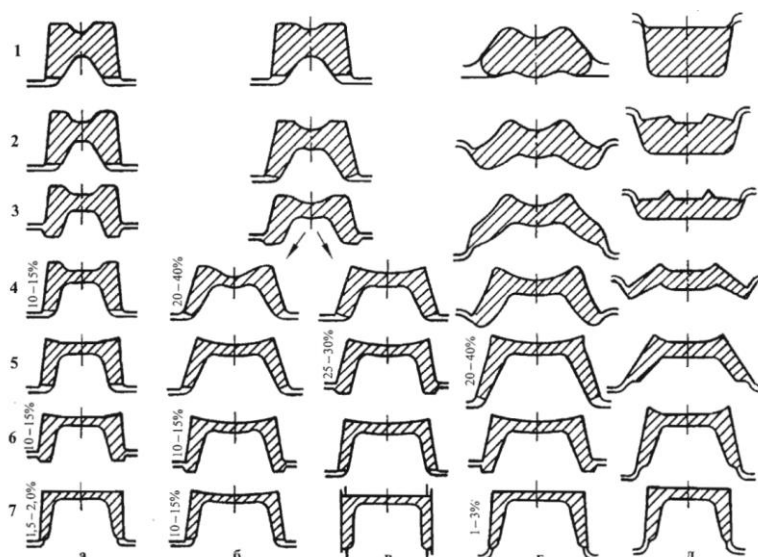


Рисунок 1.3 – Способы прокатки швеллеров: а – с увеличенным уклоном действительных фланцев и прямой стенкой (корытный способ); б – с увеличенным уклоном действительных фланцев и изогнутой стенкой; в – с применением универсального чистового калибра; г – с развернутыми действительными фланцами и изогнутой стенкой; д – сгибание прямых действительных фланцев [18, с. 16]

Для формирования черного профиля швеллера из прямоугольной заготовки используются разрезные калибры (рисунок 1.4).

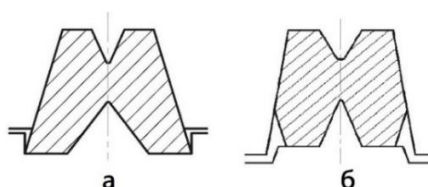


Рисунок 1.4 – Разрезные калибры: а – полузакрытый; б – закрытый снизу

Их число в схеме калибровки варьируется от 1 до 2. Форма и количество таких калибров определяются исходя из выбранного способа прокатки и размеров имеющейся исходной заготовки (рисунок 1.3).

Обработка ложных фланцев швеллера в течение всей прокатки происходит исключительно в закрытых частях калибров. Назначение ложных фланцев – обеспечить запас металла для предотвращения его утяжки при формировании острых наружных кромок между стенкой и полками (малых наружных радиусов закруглений) в чистовом калибре. Действительные фланцы обрабатываются главным образом в открытых частях калибров, преимущественно с обжатием по толщине.

Немаловажной частью швеллерной калибровки является наличие одного или двух контрольных калибров. С помощью этих калибров осуществляется контроль выполнения размеров действительных фланцев по длине и обеспечение требуемой формы торцов фланцев. Обычно контрольный калибр предшествует последнему чистовому калибру калибровки (предчистовой контрольный калибр), однако в случае необходимости дополнительного контроля используется еще один контрольный калибр, который размещают между черновыми калибрами калибровки (черновой контрольный калибр). Существует два типа контрольных калибров: закрытый и полузакрытый (рисунок 1.5).

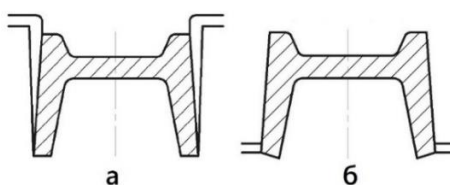


Рисунок 1.5 – Контрольные калибры: а – закрытый; б – полузакрытый

Завершается швеллерная калибровка в 1–2 чистовых калибрах, которые в отличие от черновых, не имеют ложных фланцев. Чистовой калибр всегда выполняют закрытым, действительные фланцы окончательно формируются в открытых частях калибра, что должно обеспечить получение профиля с острыми наружными углами и без заусенцев [18, с. 34].

Как правило, швеллер прокатывают действительными фланцами вниз, для облегчения стока охлаждающей воды и удаления окалины, но бывают и исключения [18, с. 34].

Таким образом, процесс швеллерной прокатки состоит из 3 основных этапов: формирование черного швеллерного профиля в разрезных калибрах, его дальнейшая прокатка в черновых калибрах с получением предчистового профиля и получение готового профиля в чистовых калибрах с предшествующим ему контролем длины полок в контрольном калибре.

1.2.1 Балочный способ прокатки швеллеров [18, 19]

Профиль швеллера схож с профилем двутавровой балки, именно поэтому

одним из самых первых способов прокатки швеллеров является балочный способ (рисунок 1.6). Преимущество данного способа заключается в использовании общих разрезных и черновых калибров (3–4 калибра) для прокатки двутавровых балок и швеллеров одинакового номера. Это приводит к сокращению парка валков и уменьшению числа перевалок при переходе с прокатки двутавровых балок на прокатку швеллеров и наоборот.

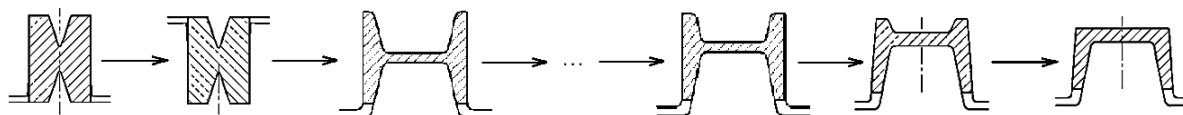


Рисунок 1.6 – Схема швеллерной калибровки прокатных валков по балочному способу

Для получения швеллера, дальнейшую прокатку полученного двутаврового профиля ведут в швеллерных калибрах с прямыми полками и шейкой с выпуском от 2 до 10 % в открытых ручьях и от 3 % и более в закрытых ручьях. В данном способе часто используют черновой и предчистовой контрольный калибры [20].

В настоящее время данный способ применяется достаточно редко [20–26], что обусловлено рядом недостатков, основным из которых является большое обжатие двутаврового профиля в швеллерных калибрах по ложным фланцам. Это приводит к значительному перемещению металла из ложных фланцев в действительные фланцы и стенку, а также получению профиля с неустойчивыми размерами. Кроме того, малые уклоны боковых стенок калибра обуславливают их повышенный износ и требуют большой величины съема металла при ремонте (переточке) валков.

На рисунке 1.7 приведена калибровка для швеллера 177,8 мм, в которой первые калибры являются общими и для прокатки балки 177,8 мм [18]. После первых четырех проходов – общих для балок и швеллеров – нижние полки двутаврового профиля обжимаются по высоте за несколько проходов в закрытых ручьях швеллерных калибров. В закрытых ручьях действительные фланцы несколько утоняются за счет небольшой величины бокового обжатия.

Представленная калибровка является одной из наиболее характерных способов производства швеллеров по балочному методу.

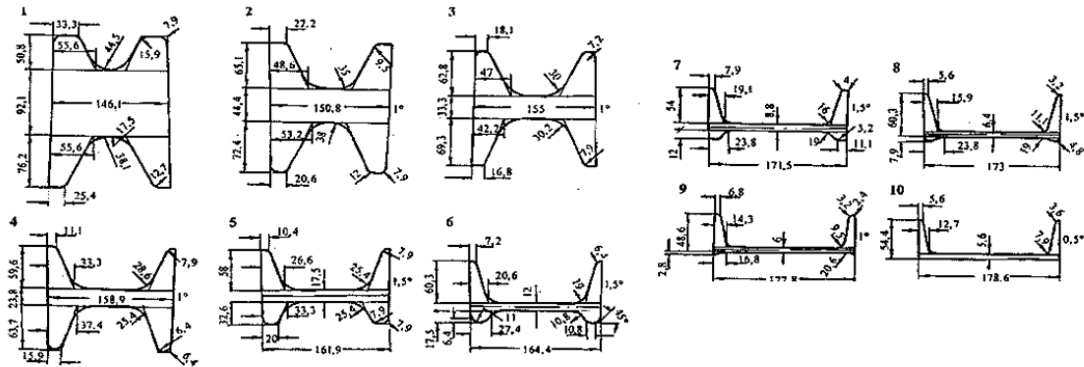


Рисунок 1.7 – Калибровка для прокатки швеллера 177,8×53,1×5,3 мм по балочному методу [18, с. 33]

1.2.2 Корытный способ прокатки [19, 27]

Дальнейшее развитие способов прокатки швеллеров шло по пути увеличения выпусков в черновых и чистовых калибрах. При прокатке по корытному способу используются прямополочные швеллерные калибры с прямой стенкой и увеличенным выпуском до 10–15 % в черновых калибрах и до 1,5–2,0 % в чистовом. В разрезном калибре глубину разрезного клина со стороны ложных фланцев делают меньше, чем со стороны действительных фланцев. Высоту полок контролируют в двух закрытых контрольных калибрах: черновом и предчистовом. Из-за существенного увеличения выпуска черновых швеллерных калибров, в качестве контрольных чернового и предчистового калибров используются калибры полуоткрытого типа. В корытных черновых и предчистовых калибрах угол между стенкой и наружной гранью действительного фланца составляет более 90°. В чистовых калибрах происходит уменьшение данного угла за счет сгибания отогнутых полок (рисунок 1.8).

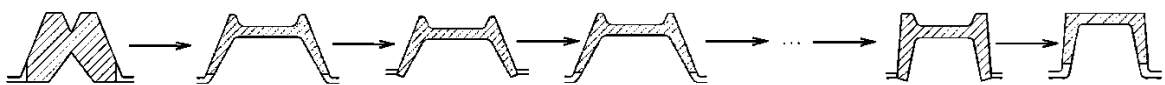


Рисунок 1.8 – Схема швеллерной калибровки прокатных валков по корытному способу

Основными преимуществами корытного способа прокатки являются:

- повышенное боковое обжатие фланцев;
- появляется возможность переточки валков с сохранением первоначальных размеров калибров с меньшим съемом металла по диаметру;
- увеличивается срок эксплуатации прокатных валков;
- благодаря меньшей глубине вреза ручьев в валки снижается расход энергии и износ прокатных валков во время прокатки, а также повышается прочность валков.

Помимо очевидных достоинств корытный способ прокатки обладает рядом недостатков. Во время прокатки швеллера по данному способу возникают трудности при входе полосы в чистовой калибр из-за разности ширины самой полосы и чистового калибра. Т.е. условия входа раската в чистовой калибр с малым выпуском ограничивают возможность дальнейшего увеличения выпусков черновых калибров. Иногда, для устранения этого недостатка в предчистовых швеллерном и контрольном калибрах выпуск калибра уменьшают до 5–8 %. Вторым недостатком является то, что малый выпуск чистового калибра сокращает срок эксплуатации чистовых валков за счет большого вреза в них и делает практически невозможной прокатку швеллеров с параллельными гранями полок.

Пример прокатки швеллера по корытному способу представлен на рисунке 1.9.

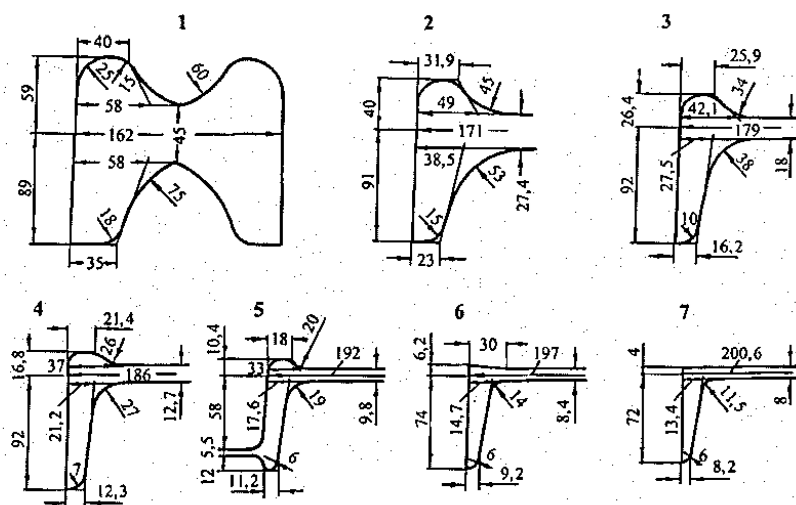


Рисунок 1.9 – Калибровка швеллера №20 за семь проходов [18, с. 34]

Несмотря на указанные недостатки, этот способ производства швеллеров достаточно распространен [26–32].

1.2.3 Способ прокатки в калибрах с увеличенным уклоном действительных фланцев и изогнутой стенкой

В данном способе прокатки практически полностью устраняются недостатки корытного способа прокатки, за счет использования калибров с прямыми полками и изогнутой стенкой. К тому же, корытный способ прокатки принято считать частным случаем прокатки в калибрах с увеличенным уклоном и изогнутой стенкой.

Выпуск калибра составляет до 40 % в черновых калибрах и до 10–15 % в предчистовом и чистовом калибрах, причем угол между средней линией стенки и наружной гранью действительного фланца сохраняется равным 90° (рисунок 1.10). Контроль высоты действительных фланцев осуществляется с помощью контрольных чернового и предчистового калибров полузакрытого типа. После каждого контрольного прохода раскат должен прокатываться в закрытом швеллерном калибре, к тому же рекомендуется после каждых четырех проходов использовать контрольный калибр.

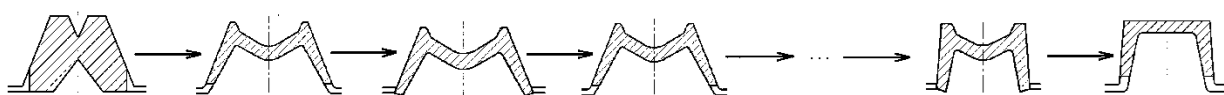


Рисунок 1.10 – Схема швеллерной калибровки прокатных валков с увеличенным выпуском и изогнутой стенкой

Окончательную форму швеллера получают правкой чистового профиля с изогнутой стенкой на роликоправильной машине или специальном доправочном устройстве.

Разновидностью получения готового профиля швеллера по данному способу прокатки является горячая гибка чистового профиля в универсальном швеллерном калибре. При этом все чистовые размеры швеллера получают в предыдущем калибре с изогнутой стенкой и выпуском 25–30 %.

Способ прокатки швеллеров с увеличенным выпуском действительных фланцев и изогнутой стенкой является в настоящее время наиболее распространенным как на линейных, так и на непрерывных станах горячей прокатки, потому он позволяет получать швеллеры и с уклоном внутренних граней и с параллельными гранями фланцев при использовании одних и тех же разрезных и черновых калибров [20, 26, 30, 33–40].

Данный способ обладает теми же преимуществами, что и корытный способ прокатки.

На рисунке 1.11 представлена калибровка с увеличенным выпуском и изогнутой стенкой для производства крупного швеллера на Нижнетагильском металлургическом комбинате.

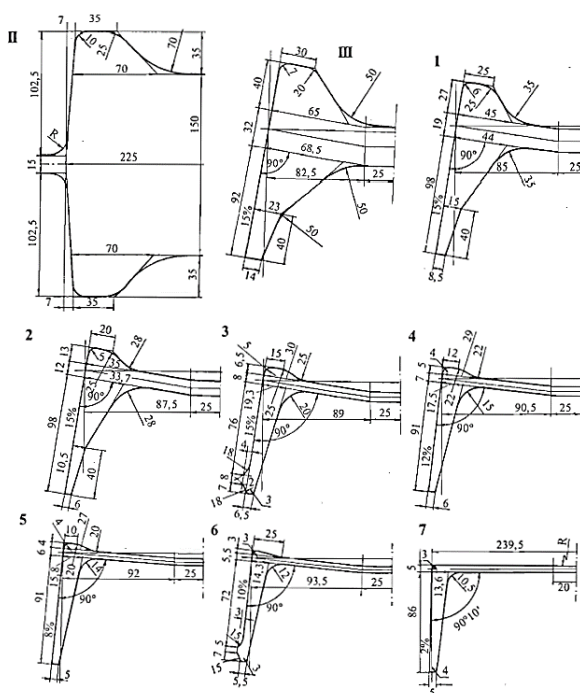


Рисунок 1.11 – Калибровка швеллера № 24 на рельсобалочном стане Нижнетагильского металлургического комбината [18, с. 40]

1.2.4 Способ прокатки в развернутых калибрах

Развернутый способ калибровки является дальнейшим развитием способа прокатки в калибрах с увеличенным выпуском и изогнутой стенкой, может быть применен как на линейных, так и на непрерывных станах [18, 19, 20, 42–53].

Развернутая калибровка представляет собой ряд кривополючных черновых калибров и предчистовой контрольный и чистовой калибры с прямыми полками (количество прямополючных калибров зависит от номера швеллера и составляет от 2 до 4) (рисунок 1.12).

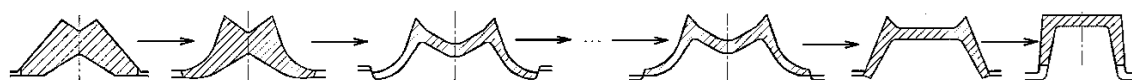


Рисунок 1.12 – Схема развернутой швеллерной калибровки прокатных валков

Выпуск прямолинейной части действительного фланца кривополючных калибров составляет 55–100%. Остальная часть фланца выполняется радиусом. Вид стенки в таких калибрах зависит от размера швеллера: при прокатке малых и средних швеллеров калибр выполняют с изогнутой стенкой, а при прокатке крупных – средний участок стенки выполняют прямолинейным. Первые, по ходу прокатки, кривополючные калибры близки по форме к полосовым, а в последующих калибрах осуществляется постепенное сгибание кривополючных действительных фланцев. Прямополючный предчистовой контрольный калибр обычно имеет выпуск от 20 до 40 %, а прямополючный чистовой – от 1 до 3 %.

Обычно черновые кривополючные калибры выполняются закрытыми, причем в схеме калибровки необходимо соблюдать чередование раздела закрытых калибров: сверху или снизу. Такой подход позволяет избежать применения черного контрольного калибра. Следовательно, для контроля высоты фланцев применяется только один контрольный калибр – предчистовой. Однако, известны случаи, когда контроль высоты фланцев производится только за счет стеснения уширения и чередования мест разъема валков в развернутых калибрах, без использования контрольных калибров.

Основными преимуществами развернутой калибровки являются:

- увеличение интенсивности деформации и сокращение числа проходов, благодаря прямому обжатию фланцев в кривополючных калибрах;
- выравнивание температуры по сечению раската;

- уменьшение износа валков за счет уменьшения величины вреза калибра в валки;
- снижение неравномерности деформации металла;
- обеспечение полной восстанавливаемости калибра при переточке валков.

К недостаткам данного способа калибровки можно отнести следующие:

- увеличение ширины калибров при развороте полок, следовательно, на бочке валков разместится меньшее число калибров;
- тяжелые условия входа раската с развернутыми фланцами в прямополочный калибр, что вызывает необходимость применения сложных вводных проводок для задачи и удерживания полосы в прямополочном калибре;
- ухудшается самоцентрирование и устойчивость раската в развернутых калибрах, в сравнении с прямополочными;
- за счет большей ширины калибров увеличенное значение силы прокатки.

На рисунке 1.13 представлена развернутая калибровка для швеллера № 16. В данной калибровке используются два переходных кривополочных калибра (4 и 5), благодаря чему достигаются условия плавного формоизменения и увеличения ширины при переходе от развернутого калибра (5) к прямополочному (6). Такая система позволяет вести прокатку швеллеров любых размеров на больших скоростях без применения вводных пропусков.

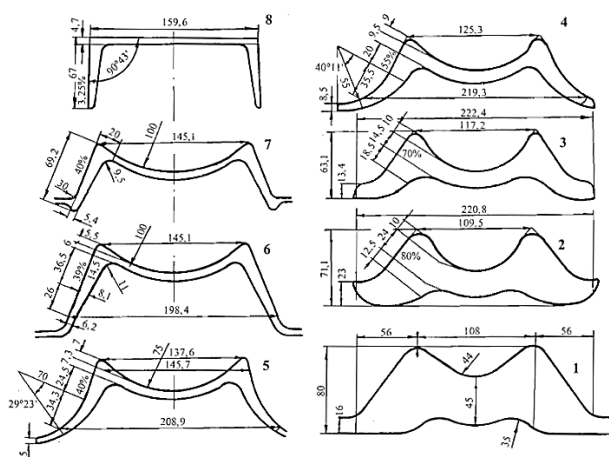


Рисунок 1.13 – Шаблоны калибров 1–8 при прокатке швеллера №16 на крупносортом стане 650 металлургического комбината «Азовсталь» [18, с. 49]

1.2.5 Прокатка по способу сгибания

При прокатке швеллеров по способу сгибания в черновых проходах применяют калибры полосового типа. В них дают интенсивное обжатие заготовки с образованием специальных выступов в местах формирования наружных углов швеллера. Черновые полосовые калибры могут быть открытыми или закрытыми, возможно также применение черновых валков с гладкой бочкой. В последующих за полосовыми калибрами осуществляют постепенное сгибание профиля при небольших обжатиях в прямополочных калибрах с прямой или изогнутой стенкой (рисунок 1.14). Однако из практики известны случаи, где сгибание профиля осуществляется только в чистовом калибре, т.е. все черновые калибры – полосовые.

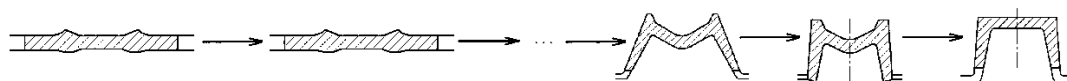


Рисунок 1.14 – Схема калибровки прокатных валков по способу сгибания

При прокатке по способу сгибания усиливаются такие преимущества развернутой калибровки, как:

- достигается наибольшая равномерность деформации по ширине профиля;
- уменьшается износ валков в связи с обеспечением минимально возможного вреза калибров в валки и наименьшей разницы рабочих диаметров в калибре;
- сокращается расход энергии при прокатке.

Несмотря на вышеперечисленные преимущества данный способ калибровки обладает рядом существенных недостатков:

- возрастает ширина калибров, следовательно, на бочке валков можно разместить меньшее количество калибров, а также увеличивается сила прокатки;
- резко ухудшаются условия входа полосового профиля в гибочный прямополочный калибр, а также центрирования раската в нем.

Редким, но в то же время, значимым недостатком, является не совпадение элементов задаваемого раската с соответствующими элементами гибочного прямопалочного калибра, что приводит к искажению профиля и, следовательно, к браку. Этот недостаток устраняется использованием специально сконструированной и тщательно настроенной вводной проводковой арматуры.

Из-за указанных недостатков калибровка по способу сгибания не получила широкого применения, однако иногда этот способ применяют для прокатки швеллеров малых размеров на средне- и мелкосортных станах горячей прокатки [18–20, 54–58].

На рисунке 1.15 представлена калибровка по способу сгибания, разработанная Г. Седлачком и предназначенная для прокатки тонкостенного швеллера № 21а. Главной особенностью данной калибровки является то, что действительные фланцы в ней образуются вследствие сильного обжатия крайних частей профиля (3–4 калибры) и получающегося при этом сильного вынужденного уширения. Подобные калибровки могут быть разработаны и для швеллеров с нормальной толщиной стенки и действительных фланцев.

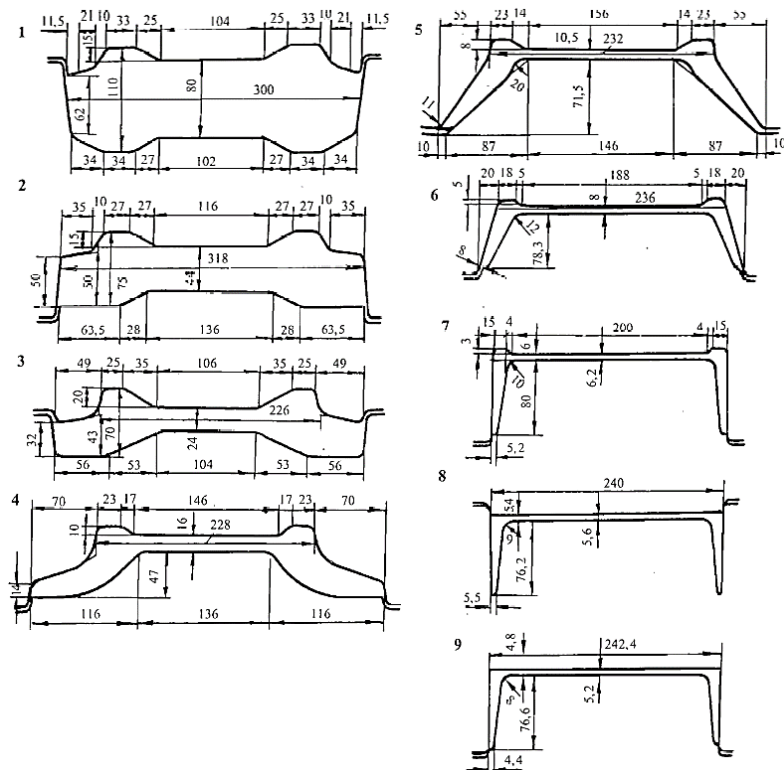


Рисунок 1.15 – Калибровка тонкостенного швеллера № 24а [18, с. 69]

1.2.6 Прокатка швеллеров в универсальных калибрах

Многие недостатки перечисленных выше способов, можно решить с помощью применения универсальных калибров.

При прокатке в универсальном четырехвалковом калибре стенка швеллера обжимается приводными горизонтальными валками, а фланцы получают прямое обжатие между не приводными вертикальными валками. При соответствующей настройке валков обеспечивается одновременная равномерная деформация всех элементов профиля, что исключает возникновение растягивающих напряжений и образование дефектов профиля [19, 33, 59].

Так как в процессе прокатки в универсальных четырехвалковых калибрах фланцы получают приращение, необходимо осуществить контроль высоты фланцев путем обжатия их в двухвалковом контрольном калибре вспомогательной клетки. Обычно вспомогательную клетку устанавливают рядом с универсальной [60].

На рисунке 1.16 представлена прокатка швеллера в универсальном калибре [60].

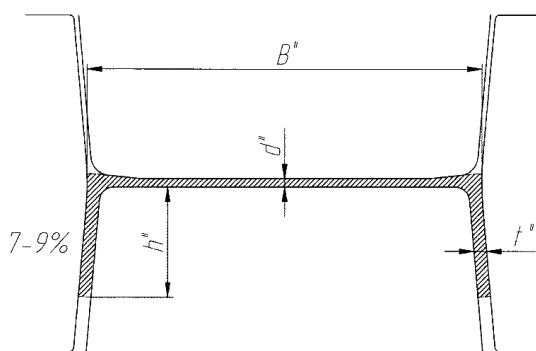


Рисунок 1.16 – Прокатка швеллера в универсальной клетке [60]

1.3 Методы расчета калибровок валков и энергосиловых параметров при прокатке швеллеров

Разработке методов расчета калибровок валков и технологических параметров при прокатке швеллеров посвящены работы В. Е. Грум-Гржимайло, Б. П. Бахтинова, М. М. Штернова, И. И. Кучко, Д. И. Старченко, Б. В. Мерекина, Б. Б. Диомидова, Н. В. Литовченко, А. П. Чекмарева, М. С. Мутьева, Р. А. Машковцева,

В. Т. Жадана, В. Е. Стефанова, И. Я. Тарновского, А. Н. Скороходова, Б. М. Илюковича, В.К. Смирнова, В.А. Шилова, А.В. Фомина и других исследователей [18–21, 27, 42, 45, 46, 61–66].

Большинство методов расчета калибровок разработано применительно к способам прокатки швеллеров в прямополочных калибрах и базируются на тех же основных положениях, что и при прокатке двутавровых балок. В практических расчетах калибровок для прокатки фасонных профилей применяют статистические, эмпирические и полуэмпирические методы, а также методы, основанные на различного рода эвристических приемах.

Расчет калибровок по этим методам обычно сводится к выполнению следующих типовых процедур: определение размеров чистового калибра, выбор числа фасонных калибров, расчет общего коэффициента деформации, расчет размеров полос и калибров по проходам, определение размеров исходной заготовки, корректировка размеров калибров и назначение выпусков [19].

По методу Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова за основу расчета калибровок валков принято условие равенства коэффициентов деформации стенки и действительных фланцев [61, 62]. Для расчета приращения и утяжки действительных фланцев, а также для определения уширения профиля применяются формулы, полученные в результате анализа скоростного режима прокатки металла в закрытом балочном калибре. Выбор коэффициентов деформации для швеллеров базируется на тех же положениях, что и для балок. Отклонения от ряда постепенно повышающихся коэффициентов деформации (по ходу прокатки) назначают только для контрольных калибров, в которых величина коэффициента деформации должна быть ограничена, так как значительные обжатия толщины фланцев в данных калибрах не допустимы. После распределения принятых общих коэффициентов деформации по проходам производят расчет размеров раскатов и калибров в каждом проходе, идя против направления прокатки от чистового калибра к разрезному.

Преимуществом данного способа является то, что он достаточно прост и дает удовлетворительные результаты при расчете калибровок валков для прокатки

швеллеров. Однако в некоторых случаях, используемые формулы могут быть недостаточно точны.

Метод расчета В. К. Смирнова, В. А. Шилова и Ю. В. Инатовича (с участием А. В. Фомина и И. Ф. Бенько) или метод расчета калибровки валков по статистическим формулам позволяет осуществлять расчет не только прямопалочных, но и развернутых калибров [19]. Согласно данному методу, для расчета размеров раскатов и калибров (против хода прокатки) при заданных размерах чистового профиля в общем случае необходимо определить следующие коэффициенты деформации и безразмерные параметры:

- коэффициенты обжатия стенки профиля, обжатия фланцев по толщине у основания и на конце;
- приведенные размеры действительных и ложных фланцев;
- относительный прогиб стенки;
- отношение полной длины фланца к длине его прямолинейного участка;
- выпуск прямолинейной части калибра;
- относительное уширение фланцев и стенки;
- показатель развертывания фланца;
- приведенный диаметр валков в чистовом калибре.

Данные безразмерные параметры однозначно характеризуют поперечное сечение прокатываемого профиля, однако в зависимости от способа прокатки некоторые параметры не рассчитываются. Например, такой безразмерный параметр, как относительный прогиб стенки рассчитывается только в случае прокатки в калибре с изогнутой стенкой.

Формулы для расчета перечисленных параметров получены в результате статистического анализа большого количества разнообразных калибровок валков для прокатки швеллеров № 6,5–40 в прямых и развернутых калибрах на прокатных станах девяти металлургических заводов. Данные статистические формулы представлены в [19].

Главным преимуществом статистического способа является возможность расчета швеллерных калибров любой конфигурации, а также легкая адаптируемость для конкретного прокатного стана.

Особенностью метода А. П. Чекмарева, М. С. Мутьева и Р. А. Машковцева [66] является использование приема "конструктивной точки" для определения размеров действительных фланцев (рисунок 1.17).

В зависимости от размеров заготовки назначают коэффициенты вытяжки по фланцам и по стенке для каждого прохода, производится расчет суммарной площади фланцев по отдельным калибрам. Уширение шейки рассчитывается по эмпирическим формулам, приращение действительных фланцев принимается по эмпирическим данным. Расчет ведется по направлению хода прокатки.

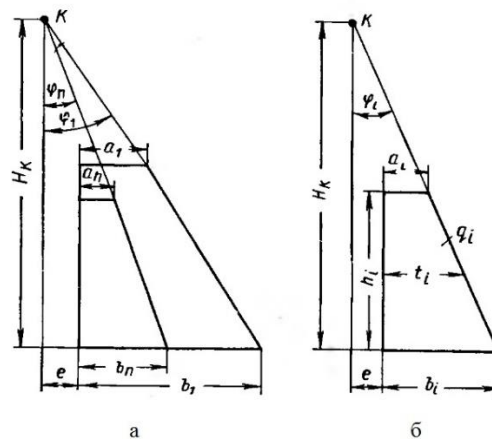


Рисунок 1.17 – Построение действительных фланцев с помощью "конструктивной точки": а – наложение контуров действительных фланцев чистового и разрезного калибров; б – контур промежуточного фланца промежуточного калибра [66, с. 341]

Недостатком данного способа расчета является то, что он не отражает действительного механизма течения металла, так как основан на эмпирических соотношениях и рассматривает упрощенный процесс прокатки при подобии контуров разрезного и чистового калибров, т.е. в полной мере не учитывает особенности прокатки швеллеров.

Также к числу эмпирических методов расчета относится метод Б. Б. Диомидова–Н. В. Литовченко [27, 67]. Расчет швеллерной калибровки

осуществляется по коэффициентам деформации элементов профиля. Авторами получены графики, показывающие зависимость среднего коэффициента вытяжки и соотношения коэффициентов обжатия по стенке и фланцам от номера швеллера (рисунки 1.18–1.19).

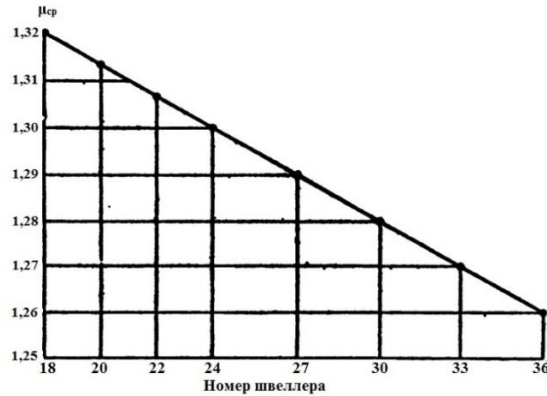


Рисунок 1.18 – Изменение среднего коэффициента вытяжки при прокатке швеллеров в зависимости от номера профиля ($\mu_{ср}=\eta_c$) [27, с.131]

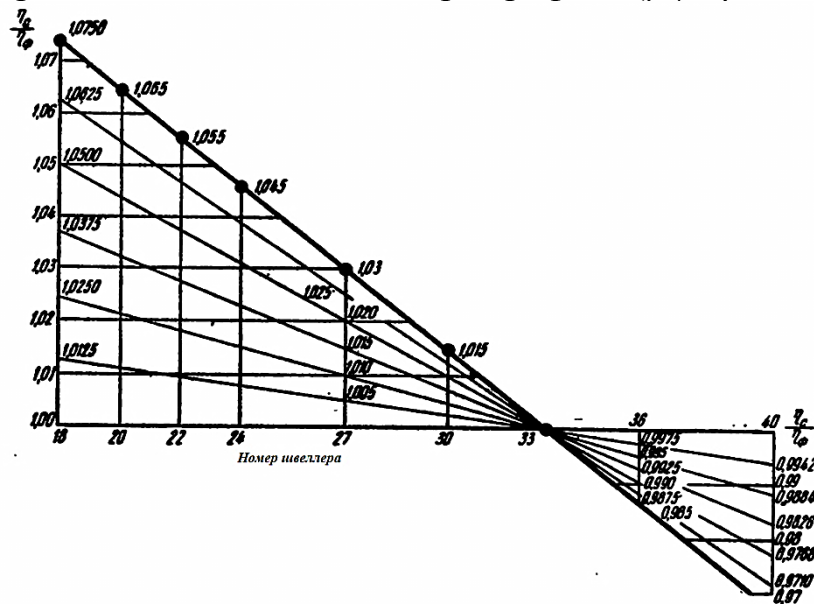


Рисунок 1.19 – Изменение отношения $\frac{\eta_c}{\eta_\phi}$ в зависимости от номера швеллера [27, с. 132]

Определив коэффициенты обжатия стенки и фланцев по данным графикам, рассчитывают размеры всех элементов профиля в каждом калибре, идя против направления прокатки. Приращение действительных и обжатие ложных фланцев назначается конструктивно, уширение стенки – по эмпирической формуле.

Основным недостатком данного метода расчета является сложность его использования в автоматизированных системах расчета калибровок прокатных валков из-за использования эмпирических графиков, таблиц и практических рекомендаций.

Метод Б. В. Мерекина основан на выполнении условия подобия калибров [68]. Размеры промежуточных калибров определяются по величине подобия. Для прокатки в чистовом калибре автором рекомендовано принимать коэффициент подобия равным 100 %. Для черновых калибров величина коэффициента увеличивается против хода прокатки, причем в первом калибре после разрезного коэффициент подобия K по рекомендациям Мерекина Б. В. должен быть:

$$K_{n+1} = 100 + (1 \div 2)n \quad (1.1)$$

где n – номер прохода против хода прокатки.

Коэффициент подобия фланцев для чистового калибра равен нулю, так как в нем отсутствуют ложные фланцы. Для других калибров величина данного коэффициента увеличивается против хода прокатки на величину $\Delta K = 5 - 18\%$ между каждыми двумя проходами. Зная величины коэффициентов подобия калибра K и фланцев K_f можно определить площади элементов калибра и их абсолютные размеры для каждого прохода.

Основным недостатком метода Б. В. Мерекина является недостаточное отражение действительного механизма течения металла и физических особенностей прокатки швеллеров.

Все вышеперечисленные методы расчета калибровок валков применяются к способам прокатки швеллеров в прямополочных калибрах. Метод расчета калибровок валков для прокатки швеллеров в развернутых калибрах впервые предложен Д. И. Старченко [42]. Он вывел определенные правила построения развернутых калибров в двух вариантах в зависимости от относительной длины стенки. Например, для швеллеров малых размеров длина прямолинейной части фланца принята равной половине его полной высоты, а прямолинейный участок шейки равным четверти полной высоты фланца. Криволинейная же часть

образуется постоянным радиусом с центром на вертикали, ограничивающей ширину калибра. Расстояние между вершинами внешних углов принято постоянным для всех развернутых калибров.

Д. И. Старченко получены соотношения и формулы для определения всех элементов развернутого калибра [42]. Коэффициент обжатия стенки в предчистовом и чистовом прямополочных калибрах рекомендуется принимать равным $1,10 \div 1,15$, а в черновых развернутых калибрах – $1,6 \div 1,8$. Уширение профиля рассчитывается по методу Б. П. Бахтинова при усредненном обжатии и толщине полосы.

Главным недостатком данного метода является невыполнение внешних углов готового профиля. Это связано с тем, что в описанной Д. И. Старченко геометрической модели построения развернутых калибров ложные фланцы не предусмотрены и угол между средней линией стенки и внешней гранью действительного фланца равен 90° .

В дальнейшем Старченко Д. И. усовершенствовал предложенный ранее метод за счет уменьшения угла между средней линией стенки и внешней гранью действительного фланца ($\alpha < 90^\circ$), что по его мнению должно обеспечить выполнение острых внешних углов на готовом профиле [69]. При этом наличие ложных фланцев также не предусмотрено. Данный метод получил название метода расчета развернутой остроугольной калибровки швеллеров.

Позднее была предложена методика расчета развернутых калибровок И. М. Кочетовым [46]. Расчет калибровки осуществляется как с применением контрольного калибра, так и без него. Также развернутые калибры здесь имеют ложные фланцы треугольного типа. Наружная грань стенки описывается радиусом, величина которого равна $1,25$ высоты стенки готового профиля и постоянна во всех калибрах. Коэффициенты обжатия стенки и фланцев задаются из таблиц практических данных.

Новая методика расчета развернутой калибровки валков для прокатки швеллеров предложена коллективом авторов: Бергеман Г. В., Антонюк С. М.,

Данченко В. Н., Краев М. В [49]. В данном методе расчета уширение средней линии стенки в чистовом калибре составляет 0,5 мм, в остальных калибрах определяется по формуле:

$$\Delta b_n = n_{\text{пр}} - 1, \quad (1.2)$$

где $n_{\text{пр}}$ – количество проходов прокатки.

Коэффициент обжатия стенки находится в пределах $1,25 \div 1,29$. Соотношение коэффициента обжатия стенки с коэффициентами обжатий элементов профиля: для основания фланца $1,06 \div 1,09$; для конца – $0,95 \div 1,05$. Авторы отмечают, что при несоблюдении приведенных режимов деформации возникает "сваливание" раската в прямополочном калибре и нестабильности высоты полок.

Расчет энергосиловых параметров осуществляется по широко известным формулам, представленным в огромном количестве учебников и учебных пособий [18–21, 27, 42, 45, 46, 61–66]. Более подробно об энергосиловых параметрах процесса прокатки прописано в главе 4.

1.4 Модели оптимизации калибровок прокатных валков

В настоящее время идеи оптимизации проникли практически во все исследования и конструкторские разработки во всех сферах человеческой деятельности. Сущность оптимизации заключается в следующем: требуется найти такой режим процесса или такие функции управления процессом, чтобы при заданных энергетических, технологических, организационных и экономических ограничениях реализовать экстремум целевой функции, достигнув этим наилучших результатов. Целевые функции могут быть весьма разнообразными: в зависимости от конкретных условий конкретного производства следует стремиться к максимальной производительности или к минимальной себестоимости, к максимально высокому качеству продукции или к максимально возможной ритмичности производства и т.д. [70–75].

Для современной металлургии характерны крупные масштабы и массовость производства, многочисленность и разнообразие занятых в производстве участков и агрегатов, тесная связь каждой стадии производственного цикла с предыдущей.

Процесс прокатки состоит из последовательно связанных единичных операций, каждая из которых представляет собой этап превращения заготовки или слитка в готовый профиль. На каждом этапе затрачивается определенное количество ресурсов производства, и поэтому стремление спроектировать и управлять цепочкой превращений так, чтобы получить максимально возможный полезный выход от процесса в целом, является вполне естественным.

В зависимости от требований, предъявленных к проектируемому процессу, или условий, сложившихся на действующих производственных линиях, оценкой полезного выхода могут быть такие категории: производительность прокатного стана, прибыль, качество готового проката, равномерность загрузки оборудования, надежность, долговечность узлов и агрегатов. Данные категории в каждом конкретном случае отражают основную и конкретную цель производства или некоторую комбинацию целей.

Прокатное производство обладает рядом особенностей, которые усложняют и затрудняют разработку оптимальных технологических процессов. Одна из трудностей состоит в том, что возникающие в прокатном производстве задачи оптимизации имеют очень большую размерность (требуют учета многих факторов и многих ограничений на величины этих факторов), связаны с существованием многих допустимых решений и не всегда могут быть четко поставлены. Большое число возможных вариантов построения технологического процесса возникают из-за многономенклатурности производства, взаимозаменяемости технологических линий или их элементов, а также многочисленности выполняемых заказов. Также для выбора наилучшего технологического процесса необходимо располагать численными значениями показателя эффективности производства (полезного выхода) по каждому из вариантов, и именно при определении количественного значения полезного выхода в зависимости от конкретных условий

технологического процесса часто возникают не только технические, но и принципиальные трудности.

Трудность разработки оптимальных технологических процессов прокатки состоит также в том, что указанные задачи являются, в значительной степени стохастическими, вероятностными. Это связано с обилием слабо действующих неконтролируемых факторов, оказывающих влияние на процесс прокатки.

Несмотря на перечисленные трудности, прокатное производство постоянно совершенствуется. Основным способом совершенствования существующих процессов прокатного производства является рационализация отдельных элементов технологии.

Одной из наиболее подвижных и восприимчивых к оптимизации компонентов прокатного производства является калибровка прокатных валков. Именно оптимизации калибровок прокатных валков посвящено большое количество работ [76–111].

Как правило, разработка калибровки прокатных валков отнимает много труда и требует всестороннего изучения большого количества материалов. Часто при создании калибровки для конкретного сортового профиля разрабатывается несколько вариантов и лучший из них выбирается с помощью последовательных испытаний, что влечет за собой затраты денежных и временных ресурсов.

По мнению З. Вусатовского главным в калибровке валков является правильный подбор соответствующих форм отдельных калибров (схема калибровки), благодаря которым можно получить правильный профиль при минимальных затратах труда и максимальной производительности. При этом промежуточные калибры должны обеспечивать хорошее заполнение их металлом и получение проката без поверхностных дефектов. Т.е. правильная калибровка в первую очередь должна учитывать технологические факторы, что способствует получению проката хорошего качества [76].

Второй, не менее важной составляющей калибровки, является режим обжатий. При разработке режима обжатий невозможно использовать какой-либо

единый четко сформулированный принцип распределения обжатий, так как заводские калибровки разрабатываются с учетом многочисленных факторов [77].

В качестве частных показателей эффективности при разработке оптимальной калибровки может быть принят один из следующих:

1. производительность;
2. расход энергии при заданной производительности;
3. себестоимость или прибыль;
4. критерий качества проката.

Учитывая указанные трудности, как правило, заводские калибровщики занимаются оптимизацией калибровки валков в виде ее рационализации, основываясь лишь на практически достигнутых результатах и имеющихся недостатках, без использования известных в математике и системотехнике идей и методик. Такую методологию нельзя признать современной и достаточной.

Большинство исследователей, занимающихся вопросами калибровки, считают, что одним из важнейших требований к калибровке является обеспечение высокой производительности стана при заданных требованиях к качеству проката [77].

Все, изученные работы по оптимизации калибровок валков для прокатки сортовых профилей можно разделить на две группы:

1. направленные на оптимизацию схемы калибровки;
2. направленные на оптимизацию режима обжатий.

1.4.1 Способы оптимизации схемы калибровки

В диссертационной работе Калугиной О. Б. по теме "Оптимизация формы вытяжных калибров по критерию эффективности деформации с целью энергосбережения" основной целью является повышение эффективности деформации при прокатке простых сортовых профилей на основе оптимизации формы калибров [1].

Автором усовершенствована методика расчета показателей формоизменения при прокатке в калибрах простой формы за счет введения поправочного

коэффициента, учитывающего влияние на вытяжку соотношений средних значений длины очага деформации к его ширине и длины очага деформации к его высоте. Введение данного коэффициента позволило снизить среднюю относительную погрешность расчета коэффициента вытяжки при сортовой прокатке до 2% как на гладких валках, так и в калибрах.

В качестве целевой функции оптимизации выбран максимальный коэффициент эффективности калибровки $K_{\text{Э}}$. Это обосновано тем, что минимальная работа деформации соответствует максимальному значению коэффициента эффективности калибровки, что ранее было доказано в научных трудах кафедры ОМД МГТУ им. Г. И. Носова. Варьируемым параметром является форма калибра, представленная в виде функции $f(t)$ на интервале (t_1, t_0) . Ограничения следующие:

- функция $x = f(t)$ на интервале (t_1, t_0) выпуклая и неубывающая;
- выпуск калибра не должен быть меньше определенной, заранее заданной величины;
- значение x_i должно позволять построить калибр первой клетки без установки валков в забой и с определенным запасом на уширение.

Для решения задачи оптимизации был выбран численный метод, основанный на векторно-матричном подходе к проектированию калибровки и рекурсивном поиске в глубину. В результате численного решения задачи оптимизации формы калибров, выявлено, что система вытяжных калибров, обеспечивающая минимум работы деформации, должна содержать неравноосные калибры с плоским дном и выпуклой боковой стенкой.

Проведена апробация полученных результатов на стане 370 ОАО «ММК». Найденное решение позволило снизить суммарную работу деформации в черновых клетях на 7%. Т. к. энергопотребление технологического процесса напрямую связано с работой деформации, то снижение работы деформации позволяет снизить затраты электроэнергии на прокатку на ту же величину, что в свою очередь, снижает издержки производства и себестоимость продукции. Достигнуто более

равномерное распределение вытяжки по проходам, что обеспечивает более равномерную загрузку двигателей по клетям.

На основе найденных численных решений предложены чертежи оптимальных калибровок вытяжных клетей стана 370 ОАО «ММК». При внедрении разработанной калибровки ожидается снижение энергозатрат на формоизменение в вытяжных калибрах на 7%, т.е. на 1,8 млн кВт·ч [1, 2].

В статье С. А. Левандовского, О. В. Синицкого и Н. А. Ручинской, рассматривая взаимосвязь таких критериев, как неравномерность деформации, стабильность процесса, точность и технологичность, установили, что форма калибра или калибров, связанных в технологическую цепочку, оказывает непосредственное влияние на движение металла в очаге деформации; на равномерность и распределение механических свойств, основанных на допустимой неравномерности деформации: на работу, совершаемую в процессе прокатки [3]. Следовательно, управляя формой калибров, можно достаточно эффективно воздействовать на процесс сортовой прокатки и обеспечивать необходимое качество готовой продукции.

В качестве критерия оптимизации (целевой функции) выбран функционал, который необходимо минимизировать: $F^0 \{ \bar{x}(\omega), \omega \} = \min f^0(\bar{x}(\omega), \omega)$. Минимизация такого функционала означает стремление к минимуму коэффициента неравномерности деформации. В качестве технологических ограничений выбраны следующие:

- заполнение калибра металлом;
- допустимая нагрузка на оборудование;
- вытяжка;
- предел варьирования формы.

Заполнение калибра в данной статье оценивается по существующей методике, рассмотренной в [78–80]. Нагрузки, оказывающие прямое воздействие на оборудование при прокатке, вычислены по известной методике, рассмотренной

в [80–82]. Вытяжка и предел варьирования формы являются ограничениями вида неравенств, имеющих функциональную зависимость.

Для определения границ допустимого диапазона вытяжек, необходимо:

- определить тип калибра;
- выбрать последовательность систем калибров;
- задать границы диапазона.

Эти данные определяются с помощью разработанного авторами алгоритма и приведенной в статье таблицы, иллюстрирующей вытяжную способность систем калибров.

Пределы варьирования формы калибра определяются следующим образом:

- верхний предел ограничивается максимально возможной площадью сечения калибра, которая зависит от эксплуатационных свойств валков и от предельных вытяжек конкретной системы калибров;
- нижний предел должен быть ограничен условием попадания в заданный диапазон вытяжек.

Сформирована математическая модель, представленная в виде программной реализации на основе разработанного алгоритма. В качестве основных шагов работы с созданной моделью выделяют:

- формирование исходных данных;
- определение параметров модели перед оптимизацией;
- порядок проведения расчетов;
- корректировку полученных результатов;
- проверочные расчеты на основе итоговых результатов.

Сформирована база данных технологических параметров сортопрокатных станов, отличительной особенностью которой является возможность анализа и учета закономерностей технологического процесса производства сортового проката, влияющих на геометрию и свойства готовой продукции.

При помощи созданных программных средств произведено моделирование режимов прокатки на пяти различных станах. Полученные результаты

свидетельствуют об эффективности предлагаемых методик совершенствования контуров калибров, позволяют снизить затраты энергии (в среднем на 3 %) и повысить результативность сортопрокатных станов, увеличив срок службы основного сменного оборудования. Снижение коэффициента неравномерности деформации (в среднем на 16,24 %) позволило уменьшить дефектность готовой продукции.

Помимо рассмотренных работ оптимизацией формы калибров и схем калибровки занимались и другие отечественные [83–93], и зарубежные авторы [94–101].

1.4.2 Способы оптимизации режима обжатий

Для поиска оптимального режима обжатий в статье Д. И. Кинзина, М. А. Рошка и С. С. Рычкова [5] в качестве целевой функции была выбрана общая работа деформации $\Sigma A_{\text{деф}}$, затрачиваемая на обжатие металла. Отдельное внимание уделялось суммарному коэффициенту эффективности калибровки ΣK_3 , характеризующему количество металла, смещенного в продольном направлении, т.е. вытяжную способность системы. Целью расчетов является калибровка с наилучшим значением коэффициента эффективности, который коррелирует с энергозатратами на прокатку при прочих равных условиях.

Для поиска режима обжатий, обеспечивающего минимальную $A_{\text{деф}}$ и максимальный K_3 , использовался инструмент «Поиск решения» в среде электронных таблиц MS Excel. В качестве ограничений были выбраны следующие параметры: неотрицательность смещенных объемов металла во всех направлениях и обжатий; необходимость получения на выходе из шестой клетки стана заготовки с размерами 92×96 мм.

В результате были получены новые величины обжатий в черновых клетях, которые позволяют снизить общую работу деформации за шесть проходов на 5% при сохранении суммарного коэффициента эффективности на прежнем уровне, что в денежном эквиваленте составило 207,8 тыс. руб. в год или 156,6 МВт*ч электроэнергии в год.

Также оптимизацией режима обжатий занимались другие отечественные [5, 102–107] и зарубежные авторы [108–111].

1.5 Выводы по главе 1

Исходя из анализа технической литературы, выявлено следующее:

- 1) В настоящее время, как швеллеры общего назначения, так и широкий спектр специальных профилей швеллерной формы являются одними из самых востребованных видов сортового проката, причем как в капитальном гражданском и промышленном строительстве, так и в машиностроении. Имеются значительные перспективы как в дальнейшем увеличении объемов производства этих профилей, так и в дальнейшем расширении профильного и марочного сортамента.
- 2) В настоящее время для производства швеллеров известно 5 основных типов калибровок прокатных валков. Известно очень большое количество разнообразных вариантов для каждого из этих типов калибровок, использующих как калибры различной конфигурации, так и различные последовательности применения этих калибров, известны достоинства и недостатки каждого из этих вариантов. Но, несмотря на широкий спектр швеллерных калибровок, можно проследить общие тенденции и закономерности формирования применяемых схем прокатки.
- 3) Каждый из известных способов прокатки швеллеров хорошо проработан теоретически – в литературе приведены в разной степени научно обоснованные методики расчета калибровок и проектирования калибров. Эти методики прошли успешную апробацию на практике при проектировании и использовании промышленных калибровок.
- 4) Работ, направленных на анализ целесообразности применения того или иного способа прокатки в конкретных условиях конкретного прокатного стана не выявлено. Так же нет работ, обсуждающих проблемы оптимизации именно швеллерных калибровок.

- 5) Вопросу оптимизации посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Это объясняется большими экономическими эффектами, получаемыми при промышленной реализации этих работ.
- 6) Все известные работы по оптимизации калибровок валков посвящены, как правило, технологиям производства простых профилей проката. Эти работы можно разделить на две группы:
1. оптимизация схемы калибровки;
 2. оптимизация режима обжатий.

На основании выполненного литературно-патентного обзора определена цель работы и поставлены задачи для ее достижения

2 МОДЕЛЬ УНИВЕРСАЛЬНОЙ «КОНЦЕПЦИИ ДВУХЭТАПНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ»

В главе 1 были рассмотрены различные варианты швеллерных калибровок валков, а также существующие способы их оптимизации [83–111]. При разработке новой калибровки валков для прокатки сложных фасонных профилей часто ориентируются на искусство и практический опыт конкретного калибровщика, нежели на научно-обоснованные методики расчетов. Часто вопросом оптимизации задаются уже после начала промышленного производства сортового профиля, что связано с альтернативностью и сложностью процесса проектирования калибровки.

В настоящее время в теории прокатки нет общей, сформированной теоретической основы проектирования калибровок прокатных валков и придания им оптимальных свойств. Анализ технической литературы показал, что известные методики значительно ограничены по сортаменту, а при общем подходе, не разработаны до состояния практического применения. Наиболее подходящим каркасом для разработки методики проектирования оптимальных калибровок валков служит системный подход, описанный в "Теории систем" [112, 113] и "Теории оптимального управления" [114].

Калибровку прокатных валков можно рассматривать как вариативную систему калибров, вполне соответствующую всем признакам общеизвестного термина "система". Следовательно, калибровка валков может быть использована в качестве объекта, подвергаемого оптимизации с использованием типовых методов и процедур теории систем [112–114].

Существует два принципиально разных пути вариативности систем:

1. некоторое количество различных по элементному составу или структуре систем обладают одним и тем же целевым назначением, и имеется возможность сравнения этих систем друг с другом по показателям качества функционирования;
2. структура системы известна и постоянна, а связи, соединяющие структурные части системы и систему с окружающей средой изменяемы, и имеется возможность сравнения видов

функционирования системы, с использованием показателей эффективности.

Данные разновидности варибельности систем обладают двумя видами оптимальности:

1. система считается оптимальной, когда лучшим образом соответствует цели в данной группе систем;
2. управления считаются оптимальными, когда предоставляют лучший вариант достижения цели при работе конкретной структуры.

В калибровке валков структурой системы является определенная последовательность калибров конкретной формы, то есть схема калибровки. Управлениями же выступают распределения обжатий по проходам – режим обжатий [115, 116]. Следовательно, оптимальная калибровка, как оптимальная система, должна обладать:

- оптимальной схемой калибровки;
- оптимальным режимом обжатий.

Такое представление о сути вопроса и накопленный практический опыт в создании калибровок прокатных валков, а также изучение технологий прокатки значительного количества различных сортовых профилей, на кафедре «Обработка металлов давлением» Уральского Федерального Университета, позволило сформировать новый концептуальный подход к разработке и оптимизации калибровок сортопрокатных валков – универсальную «Концепцию двухэтапной оптимизации». Главной целью является формулировка общей методологии проектирования и оптимизации калибровок валков для производства профилей любой формы.

Как было описано в главе 1, все известные работы отечественных и зарубежных авторов по данной тематике можно отнести либо к первому [83–101], либо ко второму [5, 102–111] варианту оптимизации калибровки валков. Работ, в которых рассматривались совместно или последовательно два варианта оптимизации калибровки валков выявлено малое количество.

Наилучшим вариантом решения задачи поиска оптимальной калибровки при проектировании технологии прокатки для любого профиля проката является совместное (одновременное) использование двух вариантов оптимизации [115–130]: поиск лучшей совокупности калибров – оптимальная схема калибровки, с лучшим управлением – оптимальным режимом обжатий. Однако, обширность, огромная вариантность и сложность конструктивных моделей решаемой задачи при таком совмещенном подходе требуют огромных вычислительных ресурсов, и на современном уровне развития информационно-вычислительной техники и технологии потребуют очень большого времени машинных расчетов, т.е. практически не реализуемо.

Поэтому, используя принцип суперпозиций, поиск оптимальных составляющих проводится в два последовательных этапа. Это позволяет упростить процедуру решения задачи, а также позволяет дополнительно учесть ряд особенностей работы промышленного прокатного стана.

В рассматриваемой «Концепции» выбрана следующая последовательность проектирования оптимальной калибровки валков, представленная на рисунке 2.1.

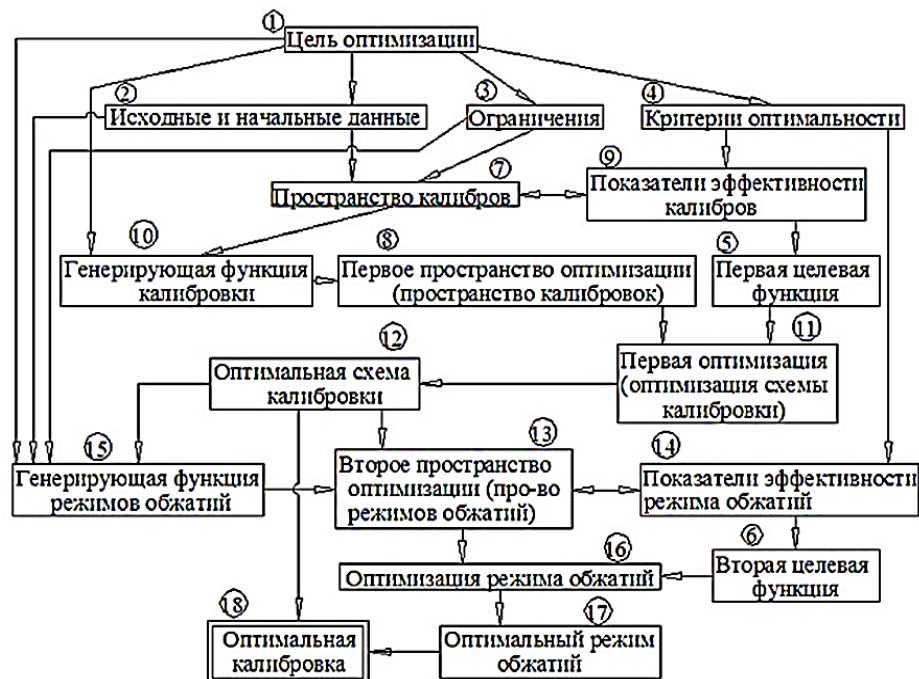


Рисунок 2.1 – Модульная схема универсальной «Концепции двухэтапной оптимизации»

Для описания «Концепции» помимо стандартных терминов и понятий, необходимо использование таких, которые не имеют широкого распространения в теории прокатки. Основой данных понятий и терминов являются аналогичные общеизвестные понятия и термины из теории систем [112, 113], теории оптимального управления [114], физики, математики и т.д. Их суть определена в процессе методичного разбора и лаконичной характеристики отдельных логических модулей, нуждающихся в тщательной проработке при реализации рассматриваемой концептуальной схемы.

Наиболее важными понятиями «Концепции» являются:

- Пространство калибров;
- Пространство схем калибровок;
- Пространство режимов обжатий.

2.1 Первый этап оптимизации. Оптимизация схемы калибровки

Первым, не по значимости, а по порядку рассмотрения логических модулей является термин – Пространство калибров.

Пространство калибров – это такое пространство, которое включает в себе все принципиально возможные варианты калибров, применяющиеся для прокатки определенного сортового профиля проката на определенном прокатном стане.

Данное пространство не интерпретируется как некоторая абсолютная математическая абстракция: для каждой определенной задачи формируется собственное определенное пространство калибров.

Пространство калибров имеет вид непрерывного, ограниченного пространства геометрических объектов [118–122]. Непрерывность гарантируется плавным преобразованием одного калибра в другой при переходе в смежную точку пространства. Плавность сопряжения гарантируется использованием понятия «обобщенный калибр» [131–132].

Обобщенный калибр – это геометрически видоизменяемый контур, описываемый с помощью универсальной обобщенной модели калибра. Форма и

размеры ручья калибра точно определены в любой точке пространства. Во время перехода из одной точки пространства калибров в следующую осуществляется гладкое, постепенное и непрерывное преобразование модели калибра путем плавной трансформации размеров и элементов обобщенного калибра.

Для упрощения модели поиска оптимума пространство калибров можно дискретизировать. Это значительно облегчит процесс его описания и дальнейшую работу с пространством несмотря на то, что дискретное представление несколько загроубляет фактическую модель.

Для формирования дискретного пространства калибров необходимо выполнить следующие процедуры:

1. определить координаты пространства;
2. произвести дискретизацию пространства путем назначения фиксированных уровней изменения каждой из координат;
3. наполнить пространство информационным содержанием.

Ограниченность пространства калибров определяется ограничениями, устанавливаемые определенным сортопрокатным станом (оборудование, прочность, мощность и т. д.).

Координатами пространства калибров выступают характеристики классификации калибров. Наиболее удобным методом выявления и описания этих отличительных характеристик, свойств однотипных объектов является метод классификации [133]. Метод классификации имеет следующий алгоритм действия:

1. Определение полного комплекса объектов, подвергаемых структурированию;
2. Анализ наиболее важных свойств, характеристик рассматриваемых объектов, выбор из них наиболее общих, их использование в качестве классификационных характеристик;
3. Установление возможных уровней варьирования каждой характеристики и их допустимых сочетаний;

4. Установление соответствия между каждым сочетанием уровней классификационных характеристик и конкретным объектом из структурируемой совокупности объектов.

Размерность пространства (число используемых характеристик) и сущностная компонента характеристик (физическая, геометрически и др.) должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Однозначно определяют калибр как единственную, уникальную точку пространства швеллерных калибров;
2. Изменение уровня (значения) любой из характеристик неизбежно приводит к изменению формы калибра, а, следовательно, и к изменению характера формообразования в нем;
3. Изменение значений выбранных характеристик имеет общетехнические, технологические, экономические или иные последствия, приводящие к изменению значения целевой функции используемого критерия оптимальности.

Размерность пространства калибров и его суть могут быть различны, в зависимости от конкретного случая поиска оптимума (различные критерии оптимальности, профили и т.д.).

В настоящем состоянии в любом сортопрокатном производстве существует большое множество «Целей оптимизации калибровки» (рисунок 2.1, модуль 1): начиная с простых вариантов (оптимизация с целью экономии энергии) и заканчивая особо сложными (оптимизация механических свойств). Такие задачи являются задачами многоцелевой оптимизации. Однако в значительном большинстве известных работ постановка оптимизационной задачи сводится к установке лишь одной цели оптимизации и соответствующего ей критерия оптимальности. Предлагаемая концепция является моделью многоцелевой оптимизации и имеет возможность применения двух критериев оптимальности:

- критерий оптимальности схемы калибровки;
- критерий оптимальности режима обжатий.

Следовательно, имеется вероятность разной формулировки целей оптимизации:

- только одна цель, с которой согласуются два критерия оптимальности;
- две различные цели с согласующимися с ними двумя разными критериями оптимальности;
- оптимум по одному из критериев, достигаемый при условии использования второго критерия в качестве ограничения (условная оптимальность).

Представленный подход к составлению целей оптимизации заметно увеличивает не только спектр решаемых задач, но и уменьшает степень абстракции теоретического решения.

За счет составления и применения логических модулей «Исходные и начальные данные» и «Ограничения» (рисунок 2.1, модули 2–3) учитываются ограничения и требования по отношению к готовому прокату, заготовке и т.п., учитывается значительное число аспектов, уменьшающих технологический потенциал определенного прокатного стана, а также возможности для применения той или иной калибровки валков.

Понятие «Критерий оптимальности» (рисунок 2.1, модуль 4) подразумевает ясно определенный способ достижения лучшего решения. Критерий оптимальности обязан соответствовать цели оптимизации и содержать в себе следующее:

- определенное пространство оптимизации;
- целевую функцию;
- правило выбора оптимального решения.

«Целевая функция» (рисунок 2.1, модули 5–6) для любого из двух критериев оптимальности является некой точно определенной зависимостью от показателей эффективности. Вид такой зависимости устанавливается точно сформулированной целью оптимизации.

Калибровку сортопрокатных валков можно представить в виде совокупности определенных точек рассмотренного пространства калибров, сформированную по конкретным правилам. Используя различные правила отбора из данного пространства, можно получить значительное количество выборок (калибровок). Совокупность всех полученных различных калибровок определяет «Пространство калибровок» или «Первое пространство оптимизации» (рисунок 2.1, модуль 8).

Калибровка валков, как и любая другая система, обладает набором свойств, характерных для отдельных калибров, из которых она состоит, а также получает новые свойства. Такие, вновь приобретаемые, свойства для однозначной идентификации называются системными характеристиками калибровки. Такие характеристики, а также свойства калибров используются для формирования «Показателей эффективности» (рисунок 2.1, модуль 9).

В пространство калибровок включены лишь те калибровки, которые позволяют получить готовый сортовой прокат, описанный в модуле «Исходные и начальные данные», с учетом модуля «Ограничений». Для образования данных калибровок из одиночных калибров, наполняющих пространство калибров, нужен некий детерминированный действующий набор правил или алгоритм, роль которого выполняет модуль 10 «Генерирующая функция калибровки».

Главной целью применения генерирующей функции калибровки является преобразование пространства калибров в пространство калибровок, т. е. преобразование одних координат в другие. Но пространство калибров является совокупностью объектов, а пространство калибровок – совокупностью групп связанных объектов, следовательно, образование и формализация генерирующей функции калибровки является важным вопросом при постановке и решении представляемой задачи оптимизации. Т. е. существует необходимость сформулировать и формализовать единое правило формирования различных калибровок с разными свойствами.

Используя первый критерий оптимальности и один из известных методов поиска оптимума целевой функции (линейное, динамическое, выпуклое программирование и т.п.) проводится «Первая оптимизация» или «Оптимизация

схемы калибровки» (рисунок 2.1, модуль 11). Полученная схема представляет собой оптимальный набор калибров, удовлетворяющих первой цели оптимизации, и называется «Оптимальной схемой калибровки» (рисунок 2.1, модуль 12).

2.2 Второй этап оптимизации. Оптимизация режима обжатий

При построении швеллерных калибровок основной деформационной характеристикой деформации в каждом i -м проходе ($i=1, 2, \dots, n_{\text{пр}}$, где $n_{\text{пр}}$ – количество проходов) принято использовать коэффициент обжатия по толщине стенки (шейки) профиля $\frac{1}{\eta_i} = \frac{d_{i-1}}{d_i}$, где d_i и d_{i-1} – толщины стенки профиля в текущем и предыдущем проходах.

Термином "*режим обжатий*" обозначим полный набор коэффициентов $\frac{1}{\eta_i}$ ($i=1, 2, \dots, n_{\text{пр}}$) для всех $n_{\text{пр}}$ – проходов при производстве конкретного профиля швеллера из конкретной исходной заготовки.

В известной литературе по калибровке прокатных валков принято задавать режим обжатий в одном из трех видов:

1. в виде таблицы, связывающей коэффициент обжатия $\frac{1}{\eta_i}$ в i -м проходе с номером прохода i , например, [61, стр. 170];
2. в виде графика, связывающего коэффициенты обжатия с номером прохода, например, [19, стр. 490];
3. в виде уравнения, связывающего те же величины, например, [27, стр. 131].

Такой подход к определению режима обжатий является общепринятым и широко распространенным, однако, при проведении оптимизационных процедур, использовать такой подход весьма неудобно. Нет возможности автоматизированного задания и, главное, целенаправленного перебора всех возможных (виртуальных) режимов обжатий. Это связано или со сложностями автоматизированного задания новых значений обжатий в таблице, или нового

графика распределения обжатий по проходам, или ограничениями, накладываемыми видом уравнения при последнем из описанных выше способе задания режима обжатий. В связи с этим разработан новый, ранее не встречавшийся нам при литературно-патентном анализе, подход к определению режима обжатий.

Конкретный режим обжатий содержит в себе однозначный набор числовых значений коэффициентов обжатий в каждом из проходов $\frac{1}{\eta_1}, \frac{1}{\eta_2}, \dots, \frac{1}{\eta_{n_{\text{пр}}}}$. Другой режим обжатий отличается другим набором числовых значений тех же коэффициентов. Поэтому, каждый из возможных (виртуальных) режимов обжатий может быть представлен в виде некоторого вектора H с однозначно определенными числовыми значениями координат $H\left(\frac{1}{\eta_1}, \frac{1}{\eta_2}, \dots, \frac{1}{\eta_{n_{\text{пр}}}}\right)$ или в виде конкретной точки с теми же координатами в векторном пространстве. Координатами (осями) такого пространства являются переменные величины, равные коэффициентам обжатия $\frac{1}{\eta_i}$.

Описанное $n_{\text{пр}}$ – мерное пространство будем называть "пространство режимов обжатий". Переход от одной точки пространства режимов обжатий к другой приводит к изменению набора числовых значений $\frac{1}{\eta_i}$ (координат), т.е. к изменению режима обжатий. Но не все точки такого пространства являются допустимыми, не каждая из точек определяет "виртуальный режим обжатий".

При обычно заданных исходной заготовке и готовом профиле швеллера между координатами вектора H существует известная связь $\prod_{i=1}^{n_{\text{пр}}} \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$, где $\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$ – полное (суммарное) обжатие $\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{d_0}{d_{n_{\text{пр}}}}$, d_0 – толщина исходной заготовки, $d_{n_{\text{пр}}}$ – толщина стенки готового горячего профиля швеллера, выходящего из чистового калибра. Такая связь является ограничением виртуальных режимов обжатий.

Например, при прокатке за 2 прохода без кантовки раската с заданной толщины d_0 до заданной толщины $d_{n_{\text{пр}}}$ ($n_{\text{пр}}=2$), между обжатиями в первом и втором проходах есть связь $\frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{1}{\eta_2} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{d_0}{d_{n_{\text{пр}}}}$. Такая связь может быть отражена графиком гиперболы, показанным на рисунке 2.2.

Все возможные (виртуальные) режимы обжатий в рассматриваемом 2-х проходном случае прокатки представляют собой точки, лежащие на линии гиперболы. Остальные точки показанного на рисунке 2.2 двумерного пространства являются недопустимыми.

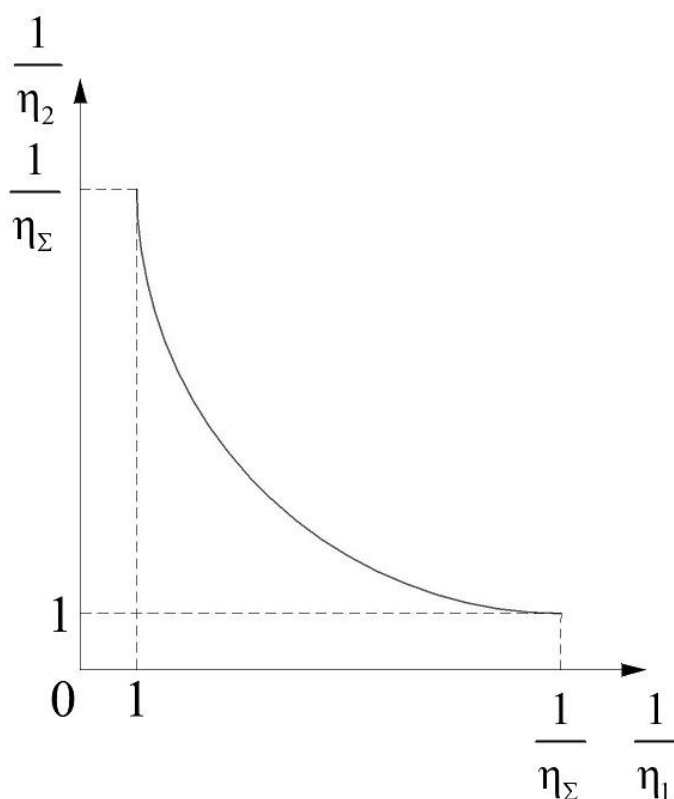


Рисунок 2.2 – Связь коэффициентов обжатий при прокатке за 2 прохода без кантовки

При прокатке за 3 прохода без кантовки раската при тех же d_0 и $d_{n_{\text{пр}}}$ ($n_{\text{пр}}=3$), между обжатиями существует связь $\frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{1}{\eta_2} \cdot \frac{1}{\eta_3} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{d_0}{d_{n_{\text{пр}}}}$. Такая связь в пространстве режимов обжатий представляет собой гиперболоид, показанный на рисунке 2.3.

В показанном на рисунке 2.3 трехмерном пространстве виртуальные режимы обжатый представляют собой точки, лежащие на поверхности гиперboloида. Остальные точки этого пространства являются недопустимыми.

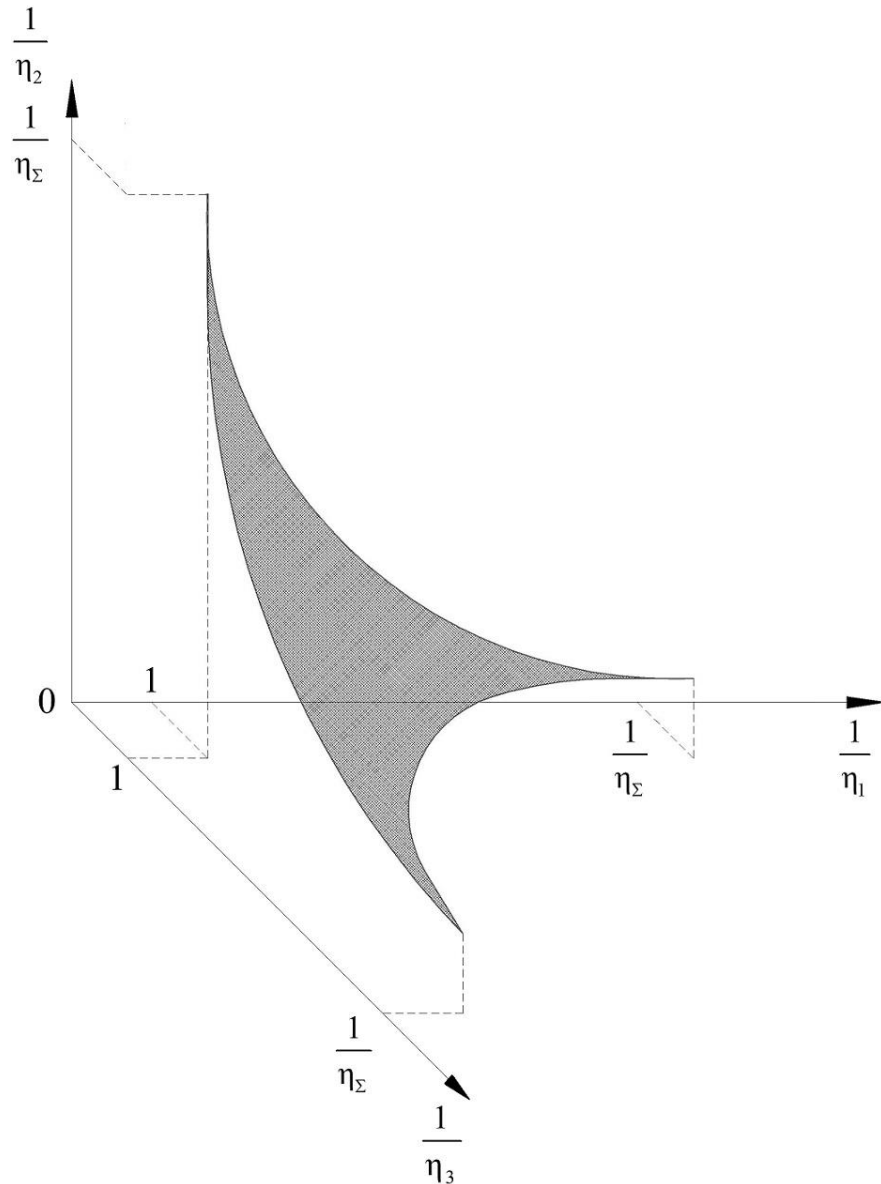


Рисунок 2.3 – Связь коэффициентов обжатый при прокатке за 3 прохода без кантовки

Пространства режимов обжатый с большей размерностью $n_{пр}$ (с большим количеством проходов) геометрически не представимы, но суть у них та же – существует некоторая гипергеометрическая поверхность, определяемая

уравнением $\prod_{i=1}^{n_{пр}} \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_\Sigma}$, каждая точка на которой является виртуальным режимом

обжатый.

Другой особенностью пространства режимов обжатий является ограниченность этого пространства. Естественными верхним и нижним ограничениями каждой из координат $\frac{1}{\eta_i}$, определяемыми самой сутью процесса продольной прокатки, является следующее неравенство:

$$1 \leq \frac{1}{\eta_i} \leq \frac{1}{\eta_{\Sigma}}. \quad (3.18)$$

Кроме того, обжатия $\frac{1}{\eta_i}$ в каждом проходе имеют и другие ограничения, связанные с захватом полосы валками, прочностью и мощностью прокатного оборудования и т. п. ограничения, которые более подробно описаны в главе 3.

Число показателей эффективности режимов обжатий, а также их физико-геометрический или другой смысл должны обеспечивать две цели:

1. Однозначность распознавания определенного режима обжатий как отдельной, фиксированной точки пространства.
2. Формулировка «Второй целевой функции» (рисунок 2.1, модуль 6) и соответствующего ей критерия оптимальности.

Для однозначной задачи режима обжатий и его изменения при поиске оптимума используется «Генерирующая функция режимов обжатий» (рисунок 2.1, модуль 15). Данный информационный модуль представляет собой некий алгоритм, использование которого позволит рассчитать распределение показателей деформации элементов профиля по проходам для определенной точки пространства режимов обжатий, обеспечив при этом плавное изменение данного распределения при переходе от одной точки данного пространства в другую. Допустимы два подхода составления генерирующей функции:

1. Разработка индивидуальных генерирующих функций для каждого отдельного профиля или группы однотипных профилей.
2. Разработка универсальной генерирующей функции, пригодной для использования при рассмотрении любого профиля.

Первый подход более прост и позволяет более точно учесть все аспекты прокатки различных видов профилей проката, однако возникает необходимость создания своей генерирующей функции для каждого нового профиля. Второй вариант сложнее, но более формален и нацелен в первую очередь на совместное использование с универсальным способом описания калибров.

В качестве генератора режимов обжатий можно использовать один из методов выпуклого программирования, широко представленных в литературе по вычислительной математике и оптимизации [70, 134–135]. Суть таких методов состоит в пошаговом поиске точки пространства оптимизации, отвечающей экстремуму. Для иллюстрации сути задачи поиска оптимума можно использовать "топографическую аналогию", изображая численные величины уровней целевой функции в виде разноцветных изобар, как это показано на рисунках 2.4–2.5.

На рисунке 2.4, а показано двумерное пространство оптимизации $(\frac{1}{\eta_1}, \frac{1}{\eta_2})$ с учетом только наиболее общих для калибровки ограничений $\prod_{i=1}^{n_{пр}} \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$ и $1 \leq \frac{1}{\eta_i} \leq \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$, первое из которых определяет область допустимых решений – линию гиперболы, а второе – границы (предельные значения координат) этой области: 1 и $\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$. На рисунке 2.4, б дополнительно учтены и другие ограничения калибровки, накладываемые оборудованием и применяемой технологией прокатки (угол захвата, допустимые сила, мощность прокатки, требования по формированию структуры металла и т.п.) в виде границ $\left[\frac{1}{\eta_i} \right]_{\min}$ и $\left[\frac{1}{\eta_i} \right]_{\max}$, сужающих область поиска оптимума).

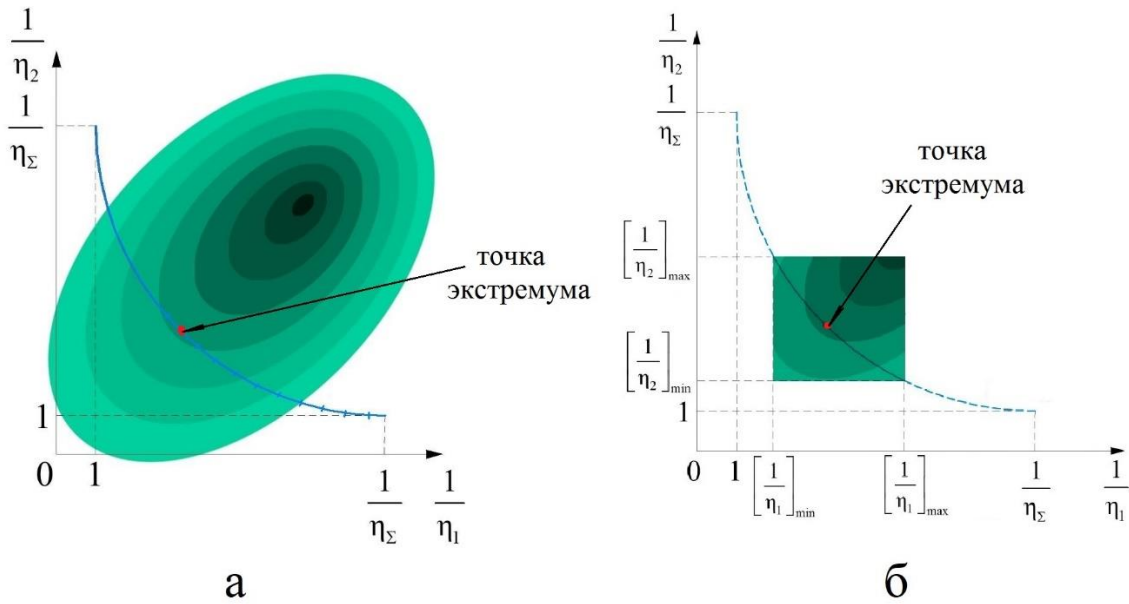


Рисунок 2.4 – Двумерное пространство оптимизации режимов обжатий: а – без ограничений; б – с ограничениями

На рисунке 2.5 показано трехмерное пространство оптимизации $(\frac{1}{\eta_1}, \frac{1}{\eta_2}, \frac{1}{\eta_3})$

с учетом ограничений $\prod_{i=1}^{n_{np}} \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$ и $1 \leq \frac{1}{\eta_i} \leq \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$. Другие ограничения (по захвату,

силе, мощности и т.п.) не показаны исключительно для упрощения рисунка, но они так же должны быть учтены, что ограничит область поиска оптимума аналогично двумерному случаю, показанному на рисунке 2.4–б. Стрелочками схематично, для примера, показана наиболее простая процедура пошагового поиска оптимума, реализующая метод покоординатного поиска Гаусса–Зейделя [134–135].

По завершении второго этапа оптимизации будет выявлен оптимальный режим обжатий для выбранной на первом этапе оптимальной схемы калибровки. Полученное решение (рисунок 2.1, модуль 18) представляет собой наилучший из возможных вариантов калибровки для прокатки рассматриваемого профиля, обладающей оптимальной структурой (оптимальной схемой калибровки) и оптимальным управлением (оптимальным режимом обжатий).

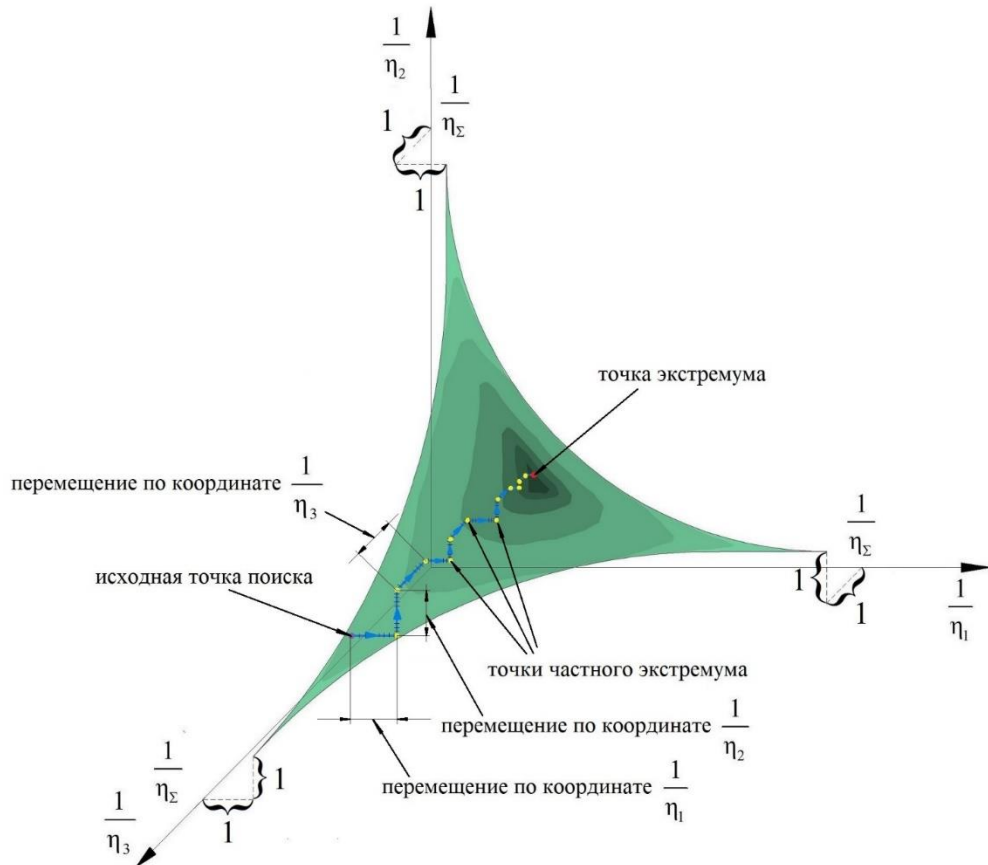


Рисунок 2.5 – Поиск оптимума в трехмерном пространстве режимов обжатий

2.3 Выводы по главе 2

Калибровка сортопрокатных валков рассмотрена с позиций современной идеологии системного подхода, как "технологическая система". Сформирована универсальная модель оптимизации калибровок, применимая при прокатке любых сортов профилей. Анализ технической литературы, а также накопленный практический опыт позволили выявить наиболее рациональную стратегию решения задачи оптимизации, заключающаяся в проведении двухэтапной оптимизации. Это дает возможность существенно упростить и ускорить решение задачи, а также использовать как один общий, так и, или два отличных критерия оптимальности на каждом этапе. При осуществлении двухкритериальной модели на первом этапе выбирается оптимальная схема калибровки, как оптимальная структура системы, а на втором – оптимальный режим обжатий, как оптимальное управление системой. а также расчет геометрии применяемых калибров.

3 МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ

Универсальная «Концепция двухэтапной оптимизации» описана в главе 2 в самых общих чертах, концептуально, и требует детализации и конкретизации применительно к каждой группе одностипных профилей проката. Ниже рассмотрено применение этой модели к технологии прокатки профилей швеллерной формы, спектр которых описан в главе 1.

3.1 Первый этап оптимизации. Постановка цели оптимизации схемы швеллерной калибровки валков

Модель первого этапа оптимизации швеллерной калибровки – оптимизации схемы калибровки, включает в себя 14 информационных модулей [122, 136–137]. На рисунке 3.1 указана строгая последовательность формирования данных модулей, каждый из которых необходимо четко сформировать и структурировать

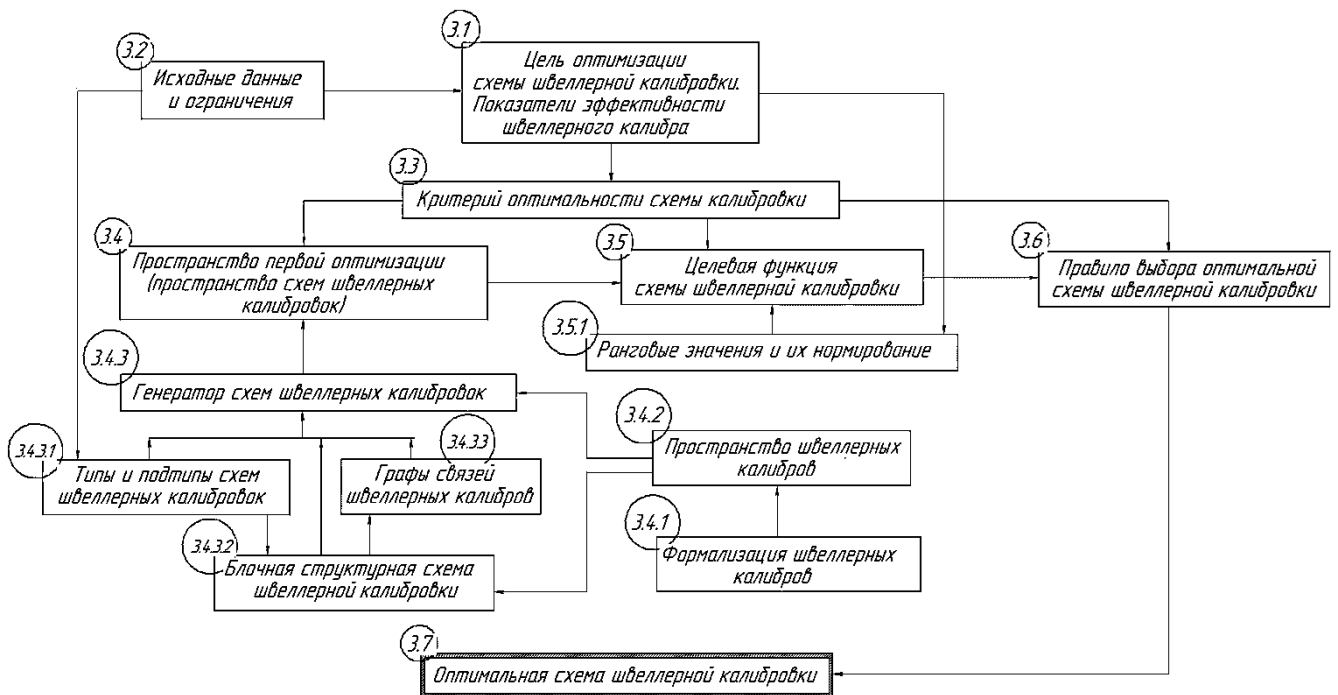


Рисунок 3.1 – Блок-схема модели первого этапа оптимизации швеллерной калибровки – оптимизации схемы калибровки

Первым шагом при разработке модели поиска оптимальной схемы швеллерной калибровки является формирование информационного модуля 3.1 «Цель оптимизации схемы калибровки».

В таблице 3.1 приведен перечень показателей эффективности, каждый из которых отражает одну из возможных целей оптимизации, к достижению которой должна стремиться "идеальная швеллерная калибровка".

Таблица 3.1 – Показатели эффективности калибров g_i входящие в целевую функцию схемы швеллерной калибровки

№	Назначение показателя	Наименование показателя	Характеристика показателя	Целевое значение	Коэффициент влияния a_i
1	2	3	4	5	6
1	Качество проката	Стабильность формоизменения	Надежный захват полосы при входе в валки, устойчивое ее положение в валках, равномерное распределение напряжений во время прохода всей полосы через данный калибр	Max	0,3
2		Образование дефектов	Наиболее распространенные дефекты: загиб концов, волнистый профиль, повышенная шероховатость поверхности, отпечатки, подрез, морщины, закаты [138]	Min	0,1
3		Износ валков	Проявления износа: растрескивание, пластическая деформация валков, окисление поверхностного слоя валков, сваривание с прокатываемой полосой, скольжение и абразивный износ [139, 140]	Min	0,1

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6
4		Сложность настройки	Затраты дополнительного времени, возможное поверхностное повреждение проката	Min	0,03
5	Использование валков	Переточка валков	Допустимая величина переточки ограничивается уменьшением прочности валка из-за уменьшения его диаметра, а также изменением размеров калибров [141]	Min	0,1
6		Использование бочки валков	Чем большее количество калибров возможно разместить на валках, тем меньшее количество самих валков будет вовлечено в процесс производства, следовательно снизятся затраты на инструмент	Max	0,05
7		Начальный диаметр валков	Чем меньше начальный диаметр валков (до врезания ручьев) тем меньше его стоимость	Min	0,03
8		Глубина вреза валков	Влияет на возможность переточки валков, их прочность и скорость износа: чем меньше глубина вреза, тем больше может быть переточка, выше прочность и меньше износ.	Min	0,1
9		Сложность валковой арматуры	Чем проще привалковая арматура, тем меньше ее стоимость [27]	Min	0,02

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6
10		Ширина буртов	Т. к. валки – дорогостоящая часть оборудования, то нужно выбрать такой минимальный размер буртов, при котором они будут выполнять свои функции без разрушения [27]	Min	0,04
11	Потребление энергии	Усилие прокатки	Чем меньшее усилие прокатки и связанный с ним крутящий момент прокатки, тем ниже риск поломки оборудования и дольше срок его службы. Чем меньшее воздействие оказывает прокат на привалковую арматуру, тем меньше ее износ и тем ниже энергозатраты.	Min	0,05
12		Воздействие на валковую арматуру		Min	0,03
13		Мощность прокатки		Min	0,05
14	Расход воды		Вода расходуется на охлаждение арматуры печей, на смыв окалины, на охлаждение подшипников и валков и пр. Расход воды зависит от типа стана и составляет в среднем 3–7 м ³ /т проката	Min	0

Расход воды практически не зависит от выбранной схемы калибровки. В таблице 3.1 он принят в качестве "фиктивного" показателя эффективности лишь для того, чтобы показать, что влияние показателя эффективности на выбор калибра

в конкретных производственных условиях может быть признано равным нулю, что не оказывает существенного воздействия на рассматриваемую ниже модель.

Также заранее учесть все показатели эффективности, принципиально возможные в рассматриваемых производственных условиях маловероятно, поэтому в каждом конкретном случае реальной практики список из таблицы 3.1 может быть либо расширен, либо сокращен. Данный факт не влияет на принципиальную суть рассматриваемого критерия оптимальности [19].

Для того, чтобы избежать неопределенности цели, каждому показателю эффективности экспертно присвоен коэффициент влияния a_i (весовой коэффициент значимости), таким образом, чтобы выполнялось условие нормирования $\sum_{i=1}^{n_{СК}} a_i = 1$, где $n_{СК}$ – количество показателей эффективности схемы калибровки. Коэффициент влияния необходим для учета важности, значимости каждого показателя эффективности в разных экономических, технических и прочих условиях реального прокатного стана.

3.2 Исходные данные и ограничения

Для построения и расчета калибровки валков необходима следующая исходная информация, представленная в таблице 3.2 [18, 19, 27, 42].

Таблица 3.2 – Исходные данные

Исходные данные	№	Характеристика	Уровень варьирования характеристики
1	2	3	4
Прокатный стан	1	Тип прокатного стана	непрерывный
			последовательный
			линейный
			реверсивный
	2	Количество рабочих клеток	-

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4
Прокатный стан	3	Количество групп рабочих клеток, количество клеток в группе, номера клеток в группе	-
	4	Тип каждой группы рабочих клеток	непрерывная
			последовательная
			линейная
реверсивная			
Рабочие клетки	5	Тип клеток	дуо
			трио
			универсальная
	6	Номинальное межосевое расстояние	-
	7	Характеристики валков	минимальный диаметр
			максимальный диаметр
			длина бочки
материал валков (стали, чугуна)			
частота вращения валков			
Привод рабочих клеток	8	Тип привода	индивидуальный
			групповой
	9	Мощность электродвигателей	-
Исходная заготовка	10	Тип заготовки	прямоугольная, с размером больше необходимого для задачи в разрезной калибр (ТЗ-1)
			прямоугольная, с размером, подходящим для задачи в разрезной калибр (ТЗ-2)

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4
Исходная заготовка	10	Тип заготовки	фасонная (ТЗ-3)
	11	Размеры сечения	высота
			ширина
			толщина шейки (только у фасонной заготовки)
	12	Максимально возможная длина (по пространству печи)	-
13	Материал	-	
Готовый швеллер	14	Вид швеллера (в зависимости от серии)	с уклоном внутренних граней полок (У)
			с параллельными гранями полок (П)
			экономичные с параллельными гранями полок (Э)
			легкой серии с параллельными гранями полок (Л)
			специальные (С)
	15	Размеры сечения	высота швеллера
			ширина полки
			толщина стенки
	16	Длина швеллера	По ГОСТ [8] и ТУ

В блок ограничений режимов сортовой прокатки входит ряд факторов, которые необходимо учитывать при проектировании оптимальной калибровки валков.

1. Проверка достаточности бочкового пространства для размещения калибров виртуальной схемы калибровки.

Проверка осуществляется по формуле:

$$\frac{L_{\text{б}} - 2L_{\text{к.б.}} - (n-1)L_{\text{ср.б.}}}{\sum_{i=1}^n B_i} \leq 1 \quad (3.1)$$

где L_6 – длина бочки валка j -й клетки; $L_{к.б.}$ – ширина крайнего бурта j -й клетки; $L_{ср.б.}$ – ширина средних буртов (между калибрами) j -й клетки; n – количество калибров; B_i – ориентировочная ширина i -го калибра.

2. Проверка возможности использования выбранных типов калибров в виртуальной схеме калибровки.

Например, при отсутствии на стане универсальных клетей нельзя использовать калибры с кодами 1115, 1125, 1135, 1215, 1235 и т.п. (присвоение кодов каждому типу калибра подробно будет рассмотрено в п. 3.4.1).

3. Ограничения по совместности калибров.

Например, нельзя использовать прямопалочный контрольный калибр (коды 1111, 1112, 1114, 1121, 1122, 1123 и т.п.) сразу вслед за развернутым калибром (коды 1311, 1312, 1314, 1321, 1322, 1324 и т.п.). Данный вид ограничений будет учтен ниже при формировании графов связей калибров, п. 3.4.3.3.

4. Дополнительные ограничения, накладываемые конструкцией прокатного стана и принятой технологией прокатки

Например, четное или нечетное количество проходов, ограничения по глубине вреза калибров в валки и т.п.

5. Условия захвата металла валками

Ограничения по условиям захвата полосы при прокатке в калибрах определяется по известной формуле, представленной во многих учебниках и учебных пособиях по теории прокатки [18–20, 27, 42, 46, 62–65].

Проверка условий захвата производится при известных размерах раскатов и калибров. Кроме того, должны быть заданы:

- частота вращения валков n ;
- материал и состояние поверхности валков;
- марка прокатываемой стали;
- температура прокатки.

6. Скоростной режим прокатки

Скорость прокатки на непрерывных и последовательных станах ограничивается установленными минимальной и максимальной скоростью. Также при прокатке на непрерывном стане скорости прокатки связаны с условием постоянства секундных объемов [18–20, 27, 42, 46, 62–65].

Поскольку скорости прокатки имеют ограничения, в связи с условием постоянства секундных объемов, то режим деформации металла также ограничивается частотой вращения валков. При прокатке на станах с последовательным расположением клетей условие постоянства секундных объемов может выполняться приближенно, так как жесткая взаимосвязь клетей через раскат отсутствует. В непрерывных и последовательных группах клетей с общим приводом условие обеспечивает получение строго определенных коэффициентов вытяжки и, следовательно, площадей поперечных сечений раскатов по клетям группы. При прокатке на линейных станах частота вращения валков во всех клетях одной линии постоянна и не оказывает прямого влияния на режим деформации металла.

7. Прочность основного оборудования стана

При построении и расчете оптимальной калибровки необходимо учитывать ограничения по допустимой силе прокатки в рабочей клетке P и допустимому крутящему моменту прокатки $M_{пр}$, определяемому по слабому звену главной линии стана (редуктору, шестеренной клетке, шпинделям, муфтам) [18–20, 27, 42, 46, 62–65].

Величины допустимой силы на шейку валка (на нажимной винт) $P_{доп}$ и допустимого крутящего момента прокатки главной линии стана $M_{доп}$, обычно указывают в паспорте оборудования стана или могут быть вычислены по допускаемым напряжениям. Возникающие при прокатке металла реакция на шейку валка от силы прокатки R_{max} и крутящий момент прокатки $M_{пр}$ рассчитывают с учетом числа раскатов, одновременно прокатываемых в клетке.

Проверку основного оборудования стана на прочность производят после расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки.

8. Мощность электродвигателя привода рабочей клетки

На современных непрерывных и последовательных станах обычно применяют индивидуальный привод клеток от электродвигателей постоянного тока. Одним из существенных ограничений при прокатке является ограничение по нагрузке электродвигателей [18–20, 27].

Проверку ограничений по мощности (крутящему моменту) электродвигателя и его перегреву проводят после расчета формоизменения и энергосиловых параметров [42, 46, 62–65]. При невыполнении этих условий необходимо корректировать рассчитанный режим обжатий.

В процессе проектирования калибровок валков необходимо учитывать также другие ограничения, связанные с получением определенного вида проката, требованиями по качеству поверхности проката, точности профиля, износу валков, длине раскатных полей стана, количеству клеток и др.

9. Ограничения по величине обжатия в швеллерной калибровке

Анализ практических данных показал, что минимальное $\frac{1}{\eta_{\min}}$ и максимальное $\frac{1}{\eta_{\max}}$ значения коэффициентов обжатия по стенке профиля в проходе должны находиться в следующих интервалах значений:

- для разрезного калибра: $1,3 \leq \frac{1}{\eta} \leq 2,5$;
- для формообразующих калибров: $1,1 \leq \frac{1}{\eta} \leq 2,0$;
- для контрольного калибра: $1,05 \leq \frac{1}{\eta} \leq 1,2$;
- для чистового калибра: $1,05 \leq \frac{1}{\eta} \leq 1,3$.

Данные рекомендации взяты из [19].

10. Ограничения на величину обжатия, накладываемые маркой прокатываемой стали [15, 16].

3.3 Критерий оптимальности схемы швеллерной калибровки валков

В понятие "критерий оптимальности схемы швеллерной калибровки валков" входят: пространство первой оптимизации (модуль 3.4), целевая функция схемы швеллерной калибровки валков (модуль 3.5), правило выбора оптимальной схемы калибровки (модуль 3.6).

3.4 Пространство первой оптимизации. Пространство схем швеллерных калибровок

Для формирования полного пространства схем швеллерных калибровок необходимо сформировать, т. е. сгенерировать отдельные виртуальные схемы швеллерных калибровок и последовательно заполнить ими данное пространство. Для этого необходимо:

1. Провести формализацию калибров, использующихся на практике при прокатке швеллеров (п. 3.4.1).
2. Сформировать пространство калибров (п. 3.4.2), как пространство отдельных элементов, входящих в состав схемы калибровки.
3. Сгенерировать все возможные схемы швеллерных калибровок на основе пространства калибров, с помощью генератора схем швеллерных калибровок (п. 3.4.3).

3.4.1 Формализация калибров, использующихся при прокатке швеллеров

Для формализации швеллерных калибров проведен анализ известных из технической литературы и практики швеллерных калибровок валков [8–11, 18–69]. Это позволило выявить основные типы формообразующих швеллерных калибров, их общие черты и принципиальные отличия [122–124].

С помощью метода классификации [133] установлены основные формообразующие характеристики (признаки) классификации швеллерного калибра:

- 1) Вид стенки – характеристика С;

- 2) Вид действительных фланцев – характеристика Д;
- 3) Вид ложных фланцев – характеристика Л;
- 4) Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр – характеристика Р.

Выбранные характеристики швеллерных калибров просты в использовании, наглядны и несут ясный физический и технологический смысл.

1. Характеристика классификации швеллерных калибров «С» – Вид стенки

Под определением вид стенки, понимается структурообразующая характеристика, отражающая форму стенки профиля швеллера в рассматриваемом калибре.

Установлено, что в большинстве реальных промышленных калибровок, применяются стенки четырех видов: прямая, вырезная, изогнутая, реже – волнистая (рисунок 3.3).

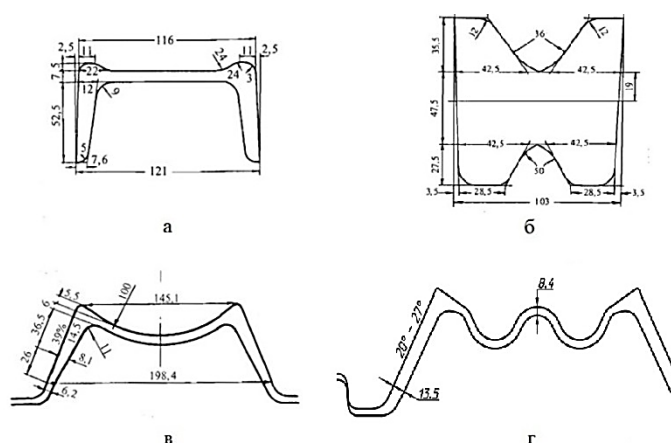


Рисунок 3.3 – Возможная форма стенки в швеллерных калибрах: а – прямая; б – вырезная; в – изогнутая; г – волнистая [18, 51]

Прямая стенка – группа «С1», в основном используется в предчистовых и чистовых клетях. Однако, в связи со схожестью профиля швеллера с профилем балки, иногда используется калибровка по балочному способу, где все швеллерные калибры имеют прямую стенку.

Вырезная стенка – группа «С2» применяется в разрезных калибрах и формируется разрезными клиньями, симметричными или несимметричными,

относительно горизонтальной оси калибра. Такой вид калибров предназначен для формирования черного профиля из прямоугольной заготовки.

Изогнутая стенка – группа «С3» имеет U-образную форму и образуется, как правило, отрезками перекрещивающихся прямых, сопряженных большим радиусом, при этом, образующие верхнего и нижнего ручьев в области стенки параллельны. Изогнутая стенка применяется при прокатке полосы преимущественно в кривополочных калибрах и калибрах с увеличенным выпуском.

Применение волнистой стенки – группа «С4» позволяет уменьшить ширину вреза калибра в валки и, тем самым увеличить количество калибров, расположенных на валках. В основном такой вид стенки используется при производстве балок, но может быть применен и при производстве швеллеров [51]. Дополнительным достоинством таких калибров является уменьшение усилия прокатки, что часто довольно важно при прокатке тонкостенных швеллеров больших номеров.

Распределение калибров по различным уровням варьирования характеристики «С» приведено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Уровни варьирования характеристики «С» – Вид стенки

Обозначение	Наименование	Форма стенки	Пример
1	2	3	4
С1	Прямая	Прямолинейная	
С2	Вырезная	Образована двумя разрезными клиньями	
С3	Изогнутая	Изогнутая по центру по большому радиусу	
С4	Волнистая	Стенка имеет несколько радиусных изгибов	

2. Характеристика классификации швеллерных калибров «Д» – Вид действительных фланцев

Выделено четыре основных вида действительных фланцев: прямые с малым уклоном; прямые с увеличенным уклоном; изогнутые; без уклона (рисунок 3.4).

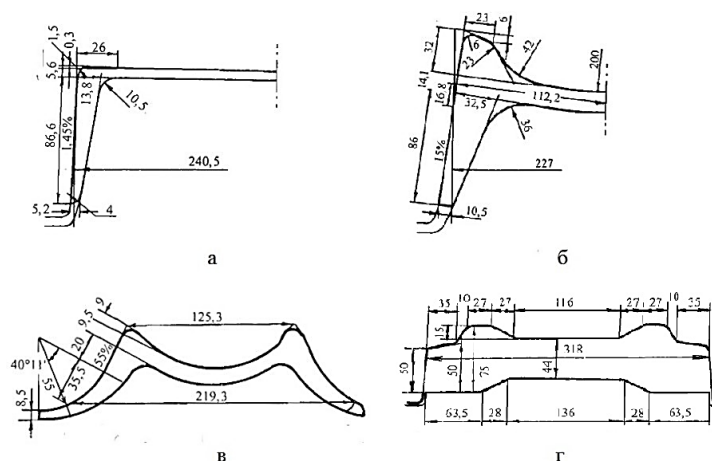


Рисунок 3.4 – Возможная форма действительных фланцев в швеллерных калибрах: а – прямые с малым уклоном; б – прямые с увеличенным уклоном; в – изогнутые; г – без уклона [18]

Прямые действительные фланцы с малым уклоном фланца – группа «Д1» (имеющие выпуск порядка 1...5%) применяются в чистовых и предчистовых калибрах, в основном, следуют после калибров с увеличенным выпуском. Также такие калибры применяются в балочных калибровках.

Прямые действительные фланцы с увеличенным уклоном – группа «Д2» имеют выпуск от 10 до 40%, а угол между средней линией стенки и наружной гранью фланца сохраняют, обычно, равным 90°. Такая форма позволяет получать швеллеры как с уклоном внутренних граней действительных фланцев, так и с параллельными. При применении в черновых калибрах выпуск составляет не более 40%, в предчистовом и чистовом – 10–15%. Для получения окончательной формы, швеллер правят на роликоправильной машине.

Изогнутые действительные фланцы – группа «Д3» применяют при прокатке в калибровках развернутого типа. Благодаря такой форме фланцев существенно уменьшается глубина вреза калибров в валки и резко повышается стойкость

калибра к износу. Недостатком использования данных фланцев является увеличение ширины калибра.

Действительные фланцы без уклона – группа «Д4» применяются в калибровках по способу сгибания. В них обеспечивается наиболее интенсивная деформация фланцев за счет прямого их обжатия.

Классификация швеллерных калибров по характеристике «Д» натолкнула на мысль об еще одной возможной форме швеллерных калибров, ранее не используемой при прокатке швеллеров – с двойным уклоном действительных фланцев – группа «Д5» [127]. Уклон осуществляется на величине $1/3$ длины действительного фланца от его конца. Часть фланца, прилежащая к стенке профиля, выполняется криволинейно по радиусу, а другая – прямолинейно (рисунок 3.5). Калибры с таким видом действительных фланцев имеют ряд существенных преимуществ и могут быть использованы в развернутых калибровках в качестве формообразующего предконтрольного и контрольного калибров.

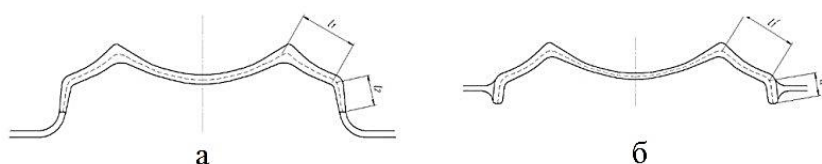


Рисунок 3.5 – Швеллерный калибр с двойным уклоном действительных фланцев:
а – формообразующий; б – контрольный

Распределение калибров по различным уровням варьирования характеристики "Д" приведено в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Уровни варьирования характеристики «Д» – Вид действительных фланцев

Обозначение	Наименование	Форма фланца	Пример
1	2	3	4
Д1	Прямые с малым уклоном	Прямолинейные с небольшим выпуском калибра.	

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4
Д2	Прямые с увеличенным уклоном	Прямолинейные с выпуском калибра от 10 до 40%	
Д3	Изогнутые	Изогнуты во внешнюю сторону	
Д4	Без уклона	Расположены в одну линию со стенкой	
Д5	С двойным уклоном	Изогнуты во внешнюю сторону, конец фланца подвернут во внутрь профиля	

3. Характеристика классификации швеллерных калибров «Л» – Вид ложных фланцев

Основными целями применения ложных фланцев в черновых швеллерных калибрах является предотвращение утяжки при формировании малого радиуса по углу швеллера и предотвращение локального подстывания металла.

При анализе литературы было выявлено 2 вида ложных фланцев: треугольные и трапециевидные (рисунок 3.6).

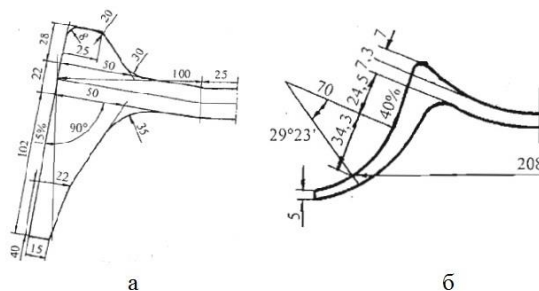
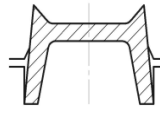
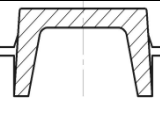


Рисунок 3.6 – Возможная форма ложных фланцев в швеллерных калибрах: а – трапециевидная; б – треугольная [18]

Распределение калибров по различным уровням варьирования характеристики "Л" приведено в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Уровни варьирования характеристики «Л» – Вид ложных фланцев

Обозначение	Наименование	Форма фланца	Пример
Л1	Треугольные	Неравносторонний треугольник	
Л2	Трапециевидны е	Вид неравнобедренной трапеции	
Л3	Без ложных фланцев	Фланцы отсутствуют	

4. Характеристика классификации швеллерных калибров «Р» – Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр

Под термином "Тип закрытия" понимается способ размещения разъема валков относительно положения поперечного сечения раската. При производстве швеллеров известны случаи использования двухвалковых калибров практически со всеми способами закрытия калибра, кроме диагонального. В настоящее время так же осуществляют прокатку швеллеров и в четырехвалковых универсальных клетях. С точки зрения формоизменения металла в калибре, способ закрытия калибра влияет, прежде всего, на степень охвата прокатываемого металла калибром, на степень контроля металла валками. Похожее контролирующее воздействия калибра на металл оказывает и изменение количества валков, образующих калибр. С увеличением количества валков степень контроля металла валками, обычно, возрастает. Учитывая сказанное, объединены внешне различные, но функционально одинаковые характеристики «тип закрытия калибра» и «количество валков, образующих калибр» в единую характеристику калибра «Р». Выделено пять уровней варьирования характеристики «Р», представленные на рисунке 3.7

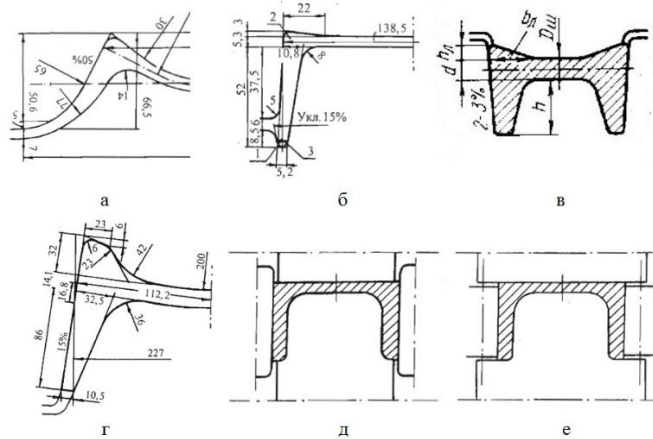


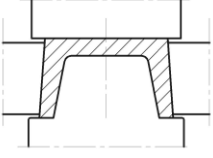
Рисунок 3.7 – Возможные типы закрытия калибра и количество валков, образующих калибр: а – открытый; б – полузакрытый; в – закрытый сверху; г – закрытый; д, е – четырехвалковые калибры с вертикальным и горизонтальным расположением разъемов, соответственно [18]

Распределение калибров по различным уровням варьирования характеристики "Р" приведено в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Уровни варьирования характеристики Р – "Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр"

Обозначение	Наименование	Характеристика	Пример
1	2	3	4
P1	Открытый	Разъем калибра расположен примерно по середине калибра	
P2	Полузакрытый	Разъем калибра смещен вниз, но находится в зоне калибра	
P3	Закрытый сверху	Разъем калибра смещен вверх, расположен вне зоны калибра	
P4	Закрытый	Разъем калибра смещен вниз, расположен вне зоны калибра	

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4
P5	4-х валковый	Калибр ограничен рабочими валками 4	

Таким образом, осуществлена строгая формализация и классификация калибров, используемых при прокатке швеллеров различных типов. Полный набор конкретных числовых значений признаков С, Д, Л и Р однозначно определяет тип (схему) швеллерного калибра.

3.4.2 Пространство швеллерных калибров

В качестве координат пространства швеллерных калибров выбраны установленные в п. 3.4.1 характеристики классификации швеллерных калибров и уровни их варьирования.

Формирование пространства калибров осуществляется путем комбинирования разных уровней варьирования характеристик классификации, приведенных в таблицах 3.3–3.6 [122–125]. Если каждой такой комбинации уровней характеристик поставить в соответствие определенную, уникальную схему швеллерного калибра, соответствующую этой комбинации, то будет получено общее дискретное пространство калибров, применяемых при прокатке швеллеров. С помощью одновременного использования принятых в таблицах 3.3–3.6 цифровых обозначений уровней варьирования характеристик, получены индивидуальные обозначения каждого калибра, называемые «кодом калибра». Закреплен следующий порядок вхождения уровней характеристик в код калибра:

- первая позиция – С – вид стенки;
- вторая позиция – Д – вид действительных фланцев;
- третья позиция – Л – вид ложных фланцев;
- четвертая позиция – Р – тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр.

Тогда код калибра будет иметь вид СДЛР. К примеру, код калибра – 1224 означает, что рассматриваемый калибр имеет прямую стенку, действительные фланцы с увеличенным уклоном, трапецевидные ложные фланцы и закрытый тип.

Характеристики С, Д, Л, Р имеют 4, 5, 3, 5 уровней варьирования соответственно, следовательно, количество калибров, полученных путем различных сочетаний этих уровней составит: $4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 5 = 300$ шт. Во время детального анализа совместимости разных уровней варьирования характеристик С, Д, Л, и Р установлено, что ряд их комбинаций геометрически невозможен. Выявлено 96 невозможных комбинаций. Для оставшихся 204 реальных сочетаний уровней варьирования характеристик составлена четырехмерная таблица, носящая название «Матрица швеллерных калибров». В данной таблице каждой конкретной комбинации уровней варьирования поставлены в соответствие конкретный калибр определенного вида и его код, идентифицирующий данный калибр. В связи с обширностью «Матрицы швеллерных калибров», в таблице 3.7 приведен только ее малый фрагмент.

Таблица 3.7 – Фрагмент матрицы швеллерных калибров

№ калибра	Уровень характеристики калибра				Код калибра	Пример калибра
	С	Д	Л	Р		
1	2	3	4	5	6	7
1	Прямая	Прямые с малым уклоном	Треугольные	Открытый	1111	
3			Треугольные	Закрытый сверху	1113	
46		Без уклона	Треугольные	Открытый	1411	
47				Полузакрытый	1412	
81	Вырезная	Прямые с малым уклоном	Трапецевидные	Открытый	2121	
82				Полузакрытый	2122	

Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6	7
184	Изогнутая	Изогнутые	Треуголь ные	Закрытый	3314	
185				4-х валковый	3315	
212		С двойным уклоном	Треуголь ные	Полузакры тый	3512	
214				Закрытый	3514	
247	Волнистая	Прямые с увеличенным уклоном	Трапецие видные	Полузакры тый	4222	
249				Закрытый	4224	

Непоследовательность порядковых номеров в первом столбце таблицы объясняется тем, что в ней приведены калибры из разных частей матрицы для того, чтобы шире представить все разнообразие пространства швеллерных калибров.

При проведении практических оптимизационных процедур для конкретного производства, пространство швеллерных калибров является совокупностью калибров, специально ограниченной рамками конкретного профиля и конкретного прокатного стана. В работе используется более общий подход, который учитывает только одно ограничение из двух – вид прокатываемого профиля, в данном случае вид швеллера. В случае необходимости, рассмотренное выше пространство может быть сокращено за счет второго ограничения, накладываемого оборудованием конкретного прокатного стана [136].

3.4.3 Генератор схем швеллерных калибровок

Для формирования пространства схем швеллерных калибровок необходимо сформировать некий алгоритм, позволяющий генерировать схемы швеллерных калибровок на основе описанного в п. 3.4.2 пространства швеллерных калибров [137]. Для этого предлагается следующий генератор виртуальных схем швеллерных калибровок валков:

1. Присвоение порядкового номера k каждой генерируемой виртуальной схеме калибровки.
2. Организация цикла первого уровня по типам заготовки ТЗ–1, ТЗ–2, ТЗ–3 (модуль 3.2).
3. Организация цикла второго уровня по типу схем швеллерных калибровок ТСК 1, ТСК 2, ТСК 3 и ТСК 4 (модуль 3.4.3.1).
4. Организация цикла третьего уровня по подтипам схем швеллерных калибровок (модуль 3.4.3.1).
5. Осуществление контроля возможности совместного использования каждого типа и подтипа виртуальных схем швеллерных калибровок с помощью системы ограничений (модуль 3.2).
6. Установление последовательности применяемых блоков калибров, определение возможного количества калибров в каждом блоке и наполнение каждого блока калибров схемами калибров, в зависимости от типа схемы калибровки (модуль 3.4.3.2).
7. Установление принципиальной возможности последовательного применения каждого калибра внутри каждого блока с помощью графов связей (модуль 3.4.3.3).
8. Установление всех возможных вариантов перехода от последнего калибра в очередном блоке к первому калибру в последующем блоке с помощью графов связей (модуль 3.4.3.3).
9. Фиксирование каждой сформированной виртуальной схемы калибровки как отдельной последовательности калибров.

Приведенный алгоритм генерации отдельной виртуальной схемы швеллерной калибровки валков представлен в виде блок-схемы в приложении А.

3.4.3.1 Типы и подтипы схем швеллерных калибровок

При проведении анализа технической литературы выделено четыре основных "типа схем швеллерных калибровок" (ТСК), каждому из которых присвоен индивидуальный код.

1. Прямополочная схема швеллерной калибровки валков – ТСК 1

В данном типе калибровки используются калибры с прямыми действительными фланцами. ТСК 1 включает в себя три подтипа швеллерной калибровки: балочный, корытный, а также с увеличенным уклоном действительных фланцев и изогнутой стенкой. Сюда относятся калибры с прямыми действительными фланцами с малым выпуском калибра до 10 % и с увеличенным выпуском – от 10 до 40 % (уровни варьирования Д1 и Д2). Тип стенки выбирается в зависимости от назначения калибра, например, для разрезного – вырезная стенка (С2), чистового – прямая (С1) [136]. На рисунке 3.8 приведены примеры калибров, используемых для построения калибровки прямополочного типа.

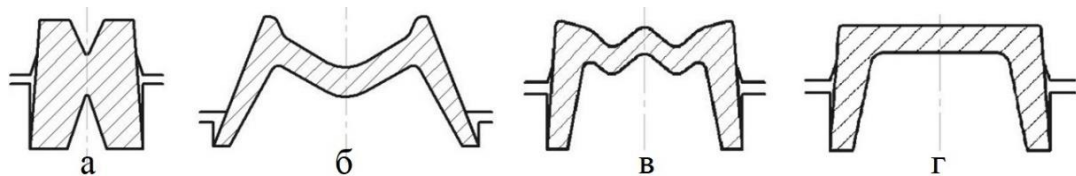


Рисунок 3.8 – Виды калибров, применяемых в прямополочном типе калибровки: а – разрезной калибр 2121; б, в – формообразующие калибры 3221,4131; г – чистовой калибр 1132

ТСК 1 делится на подтипы в зависимости от типа разрезных и формообразующих калибров, от количества используемых контрольных калибров (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Классификация прямополочных схем швеллерных калибровок валков ТСК 1

Признак классификации	Разрезные калибры							
	Балочный ТСК 11				Швеллерный ТСК 12			
Выпуск формообразующих калибров	Малый ТСК 111		Большой ТСК 112		Малый ТСК 121		Большой ТСК 122	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Количество контрольных калибров	ТСК 1111	ТСК 1112	ТСК 1121	ТСК 1122	ТСК 1211	ТСК 1212	ТСК 1221	ТСК 1222

Примеры калибровок по ТСК 1 представлены на рисунках 3.9–3.10.

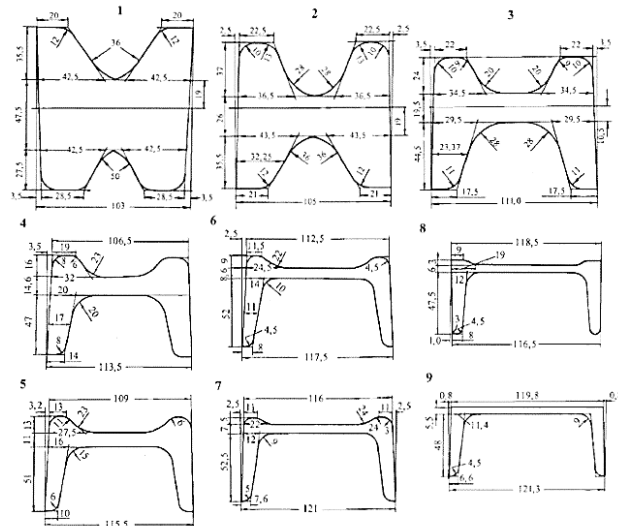


Рисунок 3.9 – Калибровка валков для прокатки швеллера №12 прямополочного типа балочного подтипа с малым уклоном и одним контрольным калибром, ТСК 1111 [18]

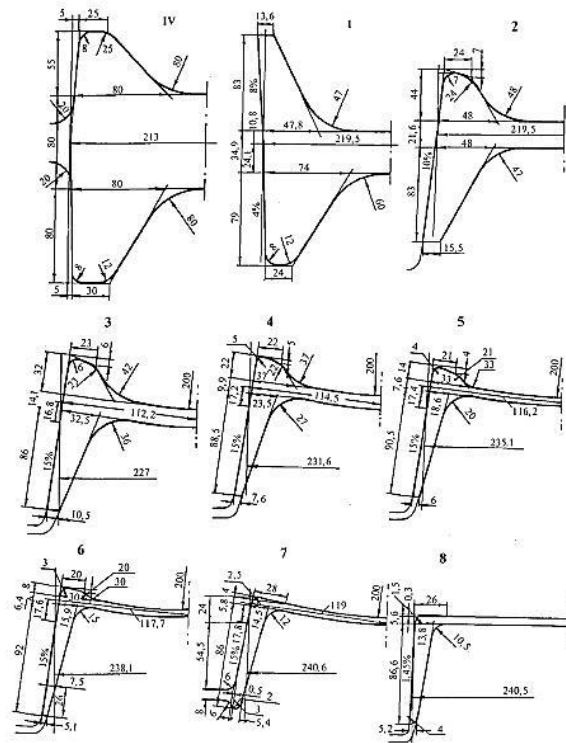


Рисунок 3.10 – Калибровка швеллера №24 на рельсобалочном стане Кузнецкого металлургического комбината балочного подтипа с большим уклоном и одним контрольным калибром, ТСК 1121 [18]

2. Развернутая схема швеллерной калибровки валков – ТСК 2

В калибровку развёрнутого типа входят калибры с изогнутыми действительными фланцами (ДЗ) и калибры с двойным уклоном действительных фланцев (Д5) [136].

На рисунке 3.11 приведены примеры калибров, используемых для развернутой калибровки.

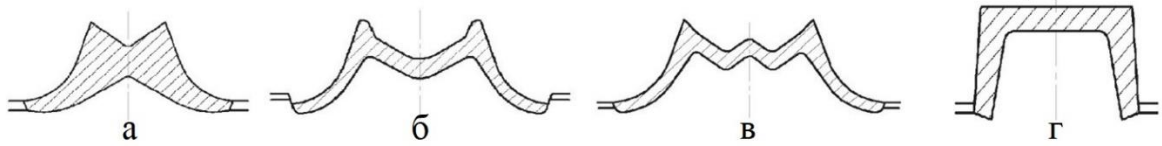


Рисунок 3.11 – Виды калибров, применяемых в развернутом типе калибровки: а – разрезной калибр 2311; б, в – формообразующие калибры 3324, 4312; г – чистовой калибр 1332

ТСК 2 делится на подтипы в зависимости от количества используемых контрольных калибров (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Классификация развернутых схем швеллерных калибровок валков ТСК 2

Признак классификации	Наличие контрольного калибра	
	Нет	Да
Контроль длины действительного фланца	ТСК 21	ТСК 22

Схема развернутой швеллерной калибровки с использованием контрольного калибра (ТСК 22) состоит из развернутых калибров и 3–5 прямополочных калибров (рисунок 3.12).

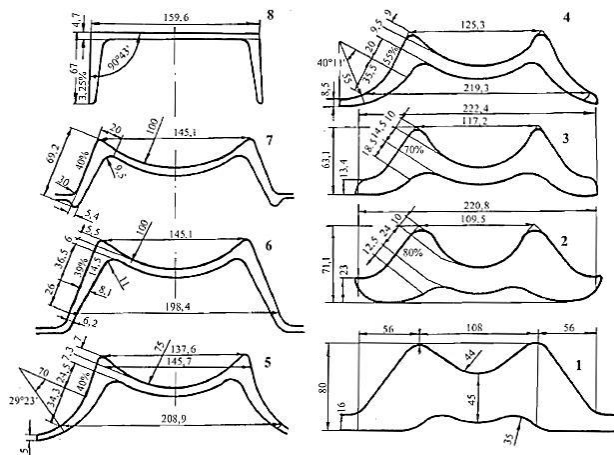


Рисунок 3.12 – Развернутая калибровка швеллера №16 с контролем величины действительных фланцев, ТСК 22 на крупносортном стане 650 металлургического комбината «Азовсталь» [18]

При развернутой калибровке без контроля величины действительных фланцев (ТСК 21) все калибры развернутые, за исключением чистового, который выполняется прямополочным (рисунок 3.13).

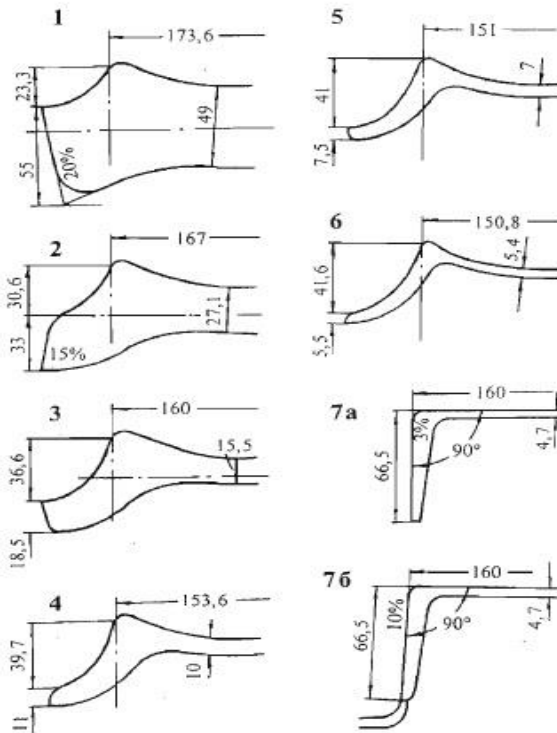


Рисунок 3.13 – Развернутая калибровка без контроля величины действительных фланцев облегченного швеллера №16 (НТМК), ТСК 21 [18]

3. Схема швеллерной калибровки валков по способу сгибания – ТСК 3

Отличие данного типа заключается в применении полосовых калибров при прокатке в первых проходах, с образованием утолщений в местах будущего изгиба. Сгибание профиля швеллера осуществляется в последних проходах с минимальным обжатием. К ТСК 3 относятся калибры без уклона (Д4), с малым (Д1) и увеличенным (Д2) выпуском действительных фланцев [2].

На рисунке 3.14 приведены примеры калибров, используемых для калибровки по способу сгибания

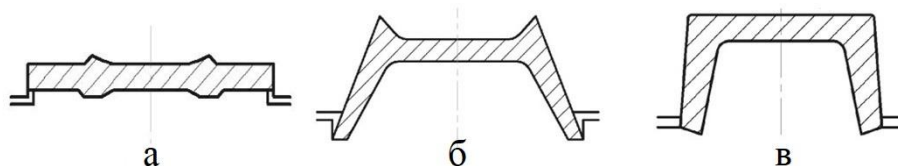


Рисунок 3.14 – Виды калибров, применяемых в прокатке по способу сгибания: а – без уклона 1414; б – формообразующий 1211, в – чистовой 1132

ТСК 3 делится на подтипы в зависимости от количества используемых контрольных калибров (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Классификация развернутых схем швеллерных калибровок валков ТСК 3

Признак классификации	Наличие контрольного калибра	
	Нет ТСК 31	Да ТСК 32
Контроль длины действительного фланца		

Примеры калибровок по способу сгибания представлены на рисунке 3.15.

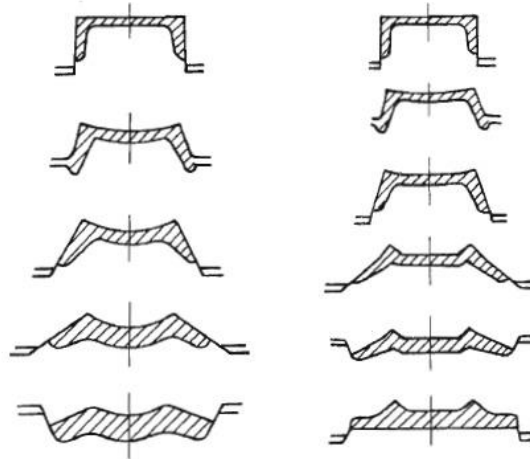


Рисунок 3.15 – Схемы калибровки швеллера по методу сгибания с применением контрольного калибра, ТСК 32 [18]

4. Комбинированная схема швеллерной калибровки валков – ТСК 4

Комбинированный ТСК является комбинацией трех предыдущих типов ТСК 1, ТСК 2 и ТСК 3. Например, в первых проходах используются полосовые калибры, а в последующих – развернутые.

На рисунке 3.16 приведены примеры калибров, используемых в комбинированной схеме калибровки:

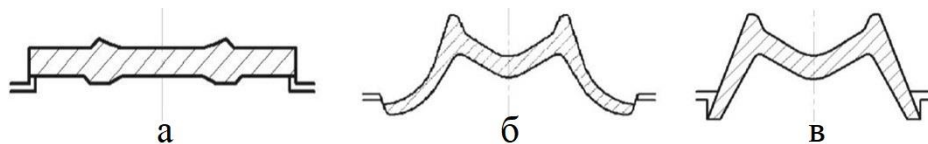


Рисунок 3.16 – Виды калибров, применяемых в комбинированной калибровке: а – без уклона 1414; б, в – формообразующие 3324, 3221[1]

Аналогично развернутой калибровке прокатка может осуществляться с контролем и без контроля величины действительных фланцев (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Классификация комбинированных схем швеллерных калибровок валков ТСК 4

Признак классификации	Варианты комбинаций калибров					
	Развернутые калибры – прямополочные калибры (ТСК 41)		Полосовые калибры – прямополочные калибры (ТСК 42)		Швеллерные прямополочные разрезные калибры – развернутые калибры (ТСК 43)	
Контроль длины действительного фланца	Нет ТСК 411	Да ТСК 412	Нет ТСК 421	Да ТСК 422	Нет ТСК 431	Да ТСК 432

Пример калибровки по комбинированному типу представлен на рисунке 3.17.

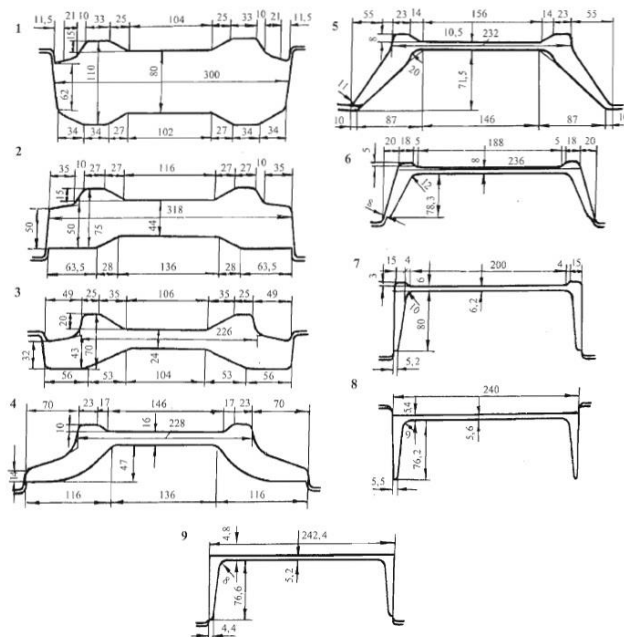
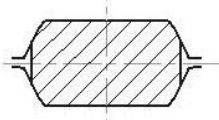
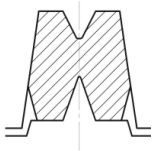
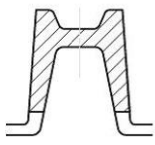
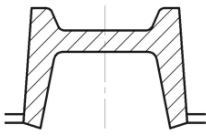
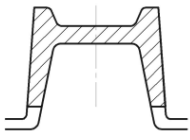
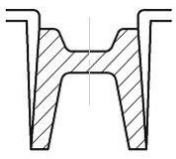
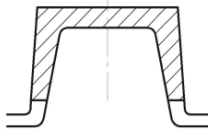


Рисунок 3.17 – Калибровка тонкостенного швеллера №24а с использованием развернутых и прямополочных калибров с контролем длины действительного фланца, ТСК 412 [18]

3.4.3.2 Блочная структурная схема швеллерной калибровки

Из анализа технической литературы установлено, что все известные схемы швеллерных калибровок валков можно представить в виде принципиальной однотипной блочной структуры, показанной в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Блочная структурная схема швеллерной калибровки

№ ¹	Наименование блока	Назначение	Пример калибра	Примечание
1	2	3	4	5
1	Обжимной	Получение требуемых размеров промежуточной заготовки		Используется система ящичных калибров
2	Разрезной	Получение разрезной заготовки		Используется при прямоугольной исходной заготовке
3	Формообразующий (черновой)	Формирование черного профиля		Используется для схем с 2 контрольными калибрами
4	Черновой контрольный калибр	Контроль длины полки		Только для схем с двумя контрольными калибрами
5	Формообразующий (промежуточный)	Формирование промежуточного профиля		Присутствует во всех схемах
6	Чистой контрольный калибр	Контроль длины полки		В схемах с 1 или 2 контрольными калибрами
7	Чистой	Формирование чистового профиля		Присутствует во всех схемах

Каждый из блоков включает в свой состав один, два или несколько калибров определенной формы. Последовательность использования блоков во всех известных швеллерных калибровках одинакова и совпадает с последовательностью, указанной в таблице 3.12. Цели применения каждого из блоков во всех калибровках однотипны. Но состав, форма и число применяемых калибров, а также схема деформации металла в различных калибровках могут сильно отличаться.

В зависимости от ТСК некоторые блоки могут не использоваться. Например, для ТСК 22 исключаются блок 3 "Формообразующий (черновой) " и блок 4 "Черновой контрольный калибр" (рисунок 3.17).

В каждый блок входят конкретные калибры, с учетом ТСК. Перечисление кодов таких калибров произведено в приложении Б.

3.4.3.3 Графы связей швеллерных калибров

Порядок использования калибров внутри блока и при переходе от калибров одного блока к калибрам другого тесно связан с целью применения и особенностями формоизменения при прокатке в калибрах данного блока.

Для точного определения любого возможного порядка использования калибров в пределах одного блока, с помощью "Теории графов" [142], разработано три основных графа связей швеллерных калибров ($G1$, $G3$, $G7$). А для установления возможного порядка использования калибров при переходе от одного блока к другому разработано 6 вспомогательных графов связей швеллерных калибров ($G2$, $G4$, $G5$, $G6$, $G8$).













В таблице 3.13 указан порядок использования графов связей швеллерных калибров, коды графов связей, причем в зависимости от ТСК, некоторые из графов связей могут не использоваться. Также указана размерность графов связей, т. е. количество калибров, входящих в граф. Например, в граф связей $G2$ входят разрезные калибры в количестве 39 штук и формообразующие – 72. Перемножение этих значений определяет количество возможных переходов в данном графе – 2808.

Таблица 3.13 – Порядок использования графов швеллерных калибров




№	Порядок использования графов	Код	Размерность графа
1	Разрезные калибры	G1	39×39
2	Разрезные – формообразующие калибры	G2	39×72
3	Формообразующие калибры	G3	72×72
4	Формообразующие – контрольные калибры	G4	72×75
5	Контрольные – формообразующие калибры	G5	75×72
6	Формообразующие калибры	G3	72×72
7	Формообразующие – контрольные калибры	G4	72×75
8	Контрольные – чистовые калибры	G6	75×18
9	Формообразующие – чистовые калибры	G7	72×18
10	Чистовые калибры	G8	18×18

Как видно из таблицы 3.13 размерности всех графов связей достаточно большие, поэтому в качестве примера, в таблице 3.14 приведен фрагмент одного из наиболее обширных графов швеллерных калибров – G3 "Формообразующие калибры". Фрагменты остальных графов связей приведены в приложении В.

Таблица 3.14 – Фрагмент графа G3 "Формообразующие калибры"

Код калибра	j	1114	1115	1124	1125	1214	1215	1224	1225	...
i	Пример калибра									...
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
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	...
1125		0	0	0	1	0	1	0	0	...

Продолжение таблицы 3.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
1214		1	1	0	0	1	1	0	0	...
1215		0	1	0	0	0	1	0	0	...
1224		0	0	1	1	0	0	1	1	...
...

Текущие индексы графа (i по вертикали и j по горизонтали) принимают значения кодов калибров, входящих в данный граф калибров. Примем, что в произвольной паре калибров индекс i соответствует предыдущему калибру, а индекс j – последующему. Величина элемента матрицы G_{ij} , стоящая на пересечении i -й строки и j -го столбца указывает на возможность использования j -го калибра в след за i -ым калибром. Любой элемент матрицы G_{ij} может принимать одно из значений 0 или 1. Если элемент $G_{ij}=0$ – вершины графа не смежные, то это означает запрет на использование j -го калибра вслед за i -ым, а если $G_{ij}=1$ – вершины графа смежные, то i -й калибр после j -го использовать можно. Матрица смежности калибров G_{ij} является не симметричной матрицей, т.е. не для всех элементов выполняется условие $G_{ij} = G_{ji}$. Например, если $G_{ij} = 1$, а $G_{ji} = 0$, то это означает, что калибр j может быть использован вслед за калибром i , а калибр i использовать вслед за калибром j запрещено.

Из указанных размерностей графов, с учетом их последовательного использования, имеется возможность 33 867 формальных переходов швеллерной полосы из одного калибра в другой. Однако, далеко не все такие переходы принципиально возможны (как указано в системе ограничений). Проанализировав все эти переходы получено 4025 реально возможных переходов, что и отражено в разработанных графах связей.

С помощью рассмотренного генератора виртуальных схем швеллерных калибровок валков последовательно наполняется пространство первой

оптимизации – пространство схем швеллерных калибровок. Объем этого пространства (количество виртуальных схем калибровок) указать заранее невозможно, т. к. он зависит от описанной выше системы ограничений, накладываемых, в частности, спецификой оборудования конкретного рассматриваемого прокатного стана и принятой на этом стане общей технологической схемой. Но в любом случае, для любого прокатного стана и любой технологии, с использованием описанного выше генератора и его составляющих можно получить огромное количество принципиально возможных (виртуальных) схем калибровок.

3.5 Целевая функция критерия оптимальности схемы швеллерной калибровки валков

В настоящее время, в условиях действующего производства, при выборе конкретной виртуальной схемы швеллерной калибровки основной задачей, чаще всего, является простое удовлетворение главной и единственной цели – получение швеллера точных размеров и форм, с комплексом свойств удовлетворяющих требованиям ГОСТ или ТУ [8].

На современном этапе развития промышленности и технологий, такой подход к формированию целевой функции уже не достаточен [134]. Сейчас общепризнано, что наилучшим вариантом при оптимизации является использование «многоцелевых» критериев оптимальности [143–145]. Поэтому, для оптимизации схемы швеллерной калибровки сформулирована «комплексная» целевая функция, позволяющая одновременно достигать максимально широкий спектр разноплановых целей, например, частных целей, указанных в таблице 3.1.

Блок-схема расчета значения целевой функции критерия оптимальности схемы швеллерной калибровки представлена на рисунке 3.18.

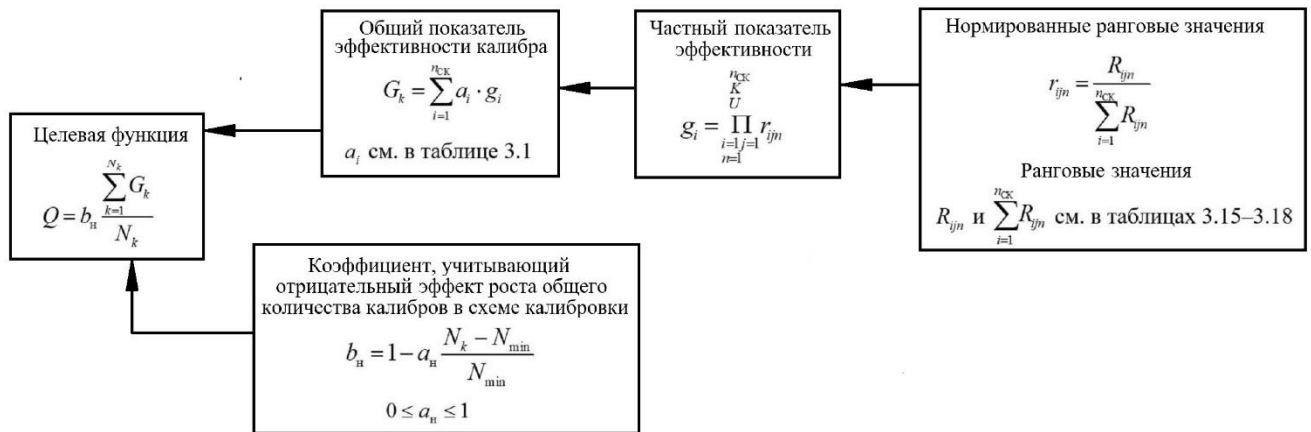


Рисунок 3.18 – Блок-схема расчета значения целевой функции критерия оптимальности схемы швеллерной калибровки

Значение целевой функции виртуальной схемы калибровки определяется по следующей формуле:

$$Q_{\text{СК}} = b_n \frac{\sum_{k=1}^{N_k} G_k}{N_k}, \quad (3.2)$$

где b_n – коэффициент, учитывающий отрицательный эффект роста общего количества калибров в схеме калибровки; G_k – общий показатель эффективности отдельного калибра; N_k – количество калибров в схеме калибровки.

Коэффициент b_n рассчитывается по формуле:

$$b_n = 1 - a_n \frac{N_k - N_{\min}}{N_{\min}}, \quad (3.3)$$

где a_n – экспертно назначаемое значение коэффициента нежелательности увеличения количества калибров, находящееся в диапазоне значений $0 \leq a_n \leq 1$; N_{\min} – минимально возможное количество калибров, применяемых при производстве конкретного швеллера на конкретном прокатном стане.

Общий показатель эффективности калибра определяется путем сложения частных показателей эффективности калибра:

$$G_k = \sum_{i=1}^{n_{\text{СК}}} a_i \cdot g_i, \quad (3.4)$$

где g_i – значение частного показателя эффективности калибра; a_i – коэффициент влияния частного показателя эффективности калибра.

Частный показатель эффективности находится по нижеприведенной формуле, причем перемножение осуществляется по индексу $j \in \{C, Д, Л, Р\}$:

$$g_i = \prod_{j=C, Д, Л, Р} r_{ijn}, \quad (3.5)$$

где r_{ijn} – нормированные ранговые значения каждого показателя эффективности по каждому уровню варьирования характеристики классификации калибра.

Нормированные ранговые значения определяются по формуле:

$$r_{ijn} = \frac{R_{ijn}}{\sum_{i=1}^{n_{СК}} R_{ijn}}, \quad (3.6)$$

где R_{ijn} – ранговые значения каждого показателя эффективности по каждому уровню варьирования характеристики классификации калибра; $\sum_{i=1}^{n_{СК}} R_{ijn}$ – сумма значений рангов для каждого из сочетаний i и j .

3.5.1 Назначение ранговых значений и их нормирование

Одним из важнейших этапов формирования целевой функции является задача «оцифровки» виртуальной схемы калибровки. Это необходимо для получения конкретного числового значения комплексной целевой функции для каждой точки сформированного ранее пространства схем швеллерных калибровок (для каждой виртуальной схемы калибровки).

Для получения конкретного числового значения целевой функции применен метод экспертной оценки и ранжирования [133, 146].

Процесс «оцифровки» виртуальной схемы калибровки осуществлен начиная с отдельных калибров, входящих в конкретную схему калибровки. Для этого использованы характеристики классификации швеллерных калибров, описанные

выше: С – 4 уровня варьирования, Д – 5 уровней варьирования, Л – 3 уровня варьирования и Р – 5 уровней варьирования.

Каждому уровню варьирования характеристики экспертно присвоен ранг по каждому из показателей эффективности из таблицы 3.1, с учетом целевого назначения рассматриваемого показателя эффективности, указанного в пятом столбце таблицы 3.1. Значение ранга показателя эффективности для конкретного сочетания уровней варьирования характеристик, образующих калибр, обозначается – R_{ijn} , где i – номер показателя эффективности из таблицы 3.1, j – условное обозначение характеристики классификации калибров ($j \in \{С, Д, Л, Р\}$), n – номер уровня варьирования характеристики классификации калибра j .

Числовые значения рангов R_{ijn} приняты таким образом, что чем сильнее уровень варьирования характеристики классификации приближает калибр к целевому значению соответствующего показателя эффективности, так же указанному в таблице 3.1, тем больший ранг он имеет. Иначе говоря, чем больше калибр удовлетворяет цели по рассматриваемому показателю эффективности, чем сильнее он приближает виртуальную схему калибровки к наилучшему значению этого показателя эффективности, тем выше его числовое значение ранга. Принято, что при одинаковой влиятельности 2-х или более уровней варьирования характеристики классификации на рассматриваемый показатель эффективности, всем этим уровням присваивается одинаковый ранг. Если какая-то характеристика классификации, по мнению экспертов, не влияет на рассматриваемый показатель эффективности, то для всех уровней варьирования этой характеристики принимается одинаковое значение ранга $R_{ijn}=1$. Результаты ранжирования швеллерных калибров (проведенного по указанным правилам) приведены в таблицах 3.15–3.18.

Такой порядок назначения рангов (чем лучше, тем больше R_{ijn}) и описанный в п. 3.5 порядок формирования целевой функции $Q_{ск}$, предполагает, что под оптимумом следует понимать максимум ($Q_{ск} \rightarrow \max$), т.е., чем "лучше" схема калибровки, тем выше будет значение $Q_{ск}$.

Таблица 3.15 – Ранги калибров R_{ijn} по характеристике классификации С – "Вид стенки"

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристики классификации С				$\sum_{i=1}^n R_{iCn}$
		прямая 	вырезная 	изогнутая 	волнистая 	
1	Стабильность формоизменения	3	1	2	2	8
2	Образование дефектов	3	1	2	2	8
3	Износ	3	1	2	2	8
4	Сложность настройки	2	2	1	1	6
5	Переточка валков	2	1	2	2	7
6	Использование бочки валков	1	3	2	3	9
7	Начальный диаметр валков	1	1	1	1	4
8	Глубина вреза валков	1	1	1	1	4
9	Валковая арматура	2	2	1	1	6
10	Ширина буртов	1	1	1	1	4
11	Усилие прокатки	2	1	3	3	9
12	Воздействие на валковую арматуру	2	1	3	3	9
13	Мощность прокатки	2	1	3	3	9
14	Расход воды	1	1	1	1	4

Таблица 3.16 – Ранги калибров R_{ijn} по характеристике классификации Д – «Вид действительных фланцев»

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристики классификации Д					$\sum_{i=1}^n R_{iDn}$
		прямые с малым уклоном 	прямые с увеличенным уклоном 	изогнутые 	без уклона 	с двойным уклоном 	
1	Стабильность формоизменения	3	3	1	4	2	13
2	Образование дефектов	1	2	3	5	4	15
3	Износ	1	2	3	5	4	15
4	Сложность настройки	3	3	1	4	2	13
5	Переточка валков	1	2	3	5	4	15
6	Использование бочки валков	5	4	2	1	3	15
7	Начальный диаметр валков	1	2	3	5	4	15
8	Глубина вреза валков	1	2	3	5	4	15
9	Валковая арматура	3	3	1	4	2	13
10	Ширина буртов	4	2	1	4	3	14
11	Усилие прокатки	5	4	2	1	3	15
12	Воздействие на валковую арматуру	5	4	2	1	3	15
13	Мощность прокатки	5	4	2	1	3	15
14	Расход воды	1	1	1	1	1	5

Таблица 3.17 – Ранги калибров R_{ijn} по характеристике классификации Л – «Вид ложных фланцев»

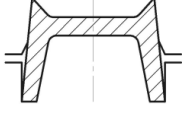
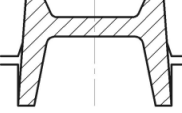
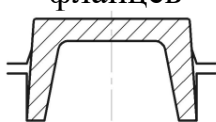
i	Показатель эффективности	Уровень n характеристике классификации Л			$\sum_{i=1}^n R_{ijn}$
		треугольные 	трапециевидные 	без ложных фланцев 	
1	Стабильность формоизменения	1	1	2	4
2	Образование дефектов	1	2	3	6
3	Износ	1	1	2	4
4	Сложность настройки	1	1	2	4
5	Переточка валков	1	1	2	4
6	Использование бочки валков	1	1	1	3
7	Начальный диаметр валков	1	1	1	3
8	Глубина вреза валков	1	1	2	4
9	Валковая арматура	1	1	1	3
10	Ширина буртов	1	1	1	3
11	Усилие прокатки	2	2	1	5
12	Воздействие на валковую арматуру	2	2	1	5
13	Мощность прокатки	2	2	1	5
14	Расход воды	1	1	1	3

Таблица 3.18 – Ранги калибров R_{ijn} по характеристике классификации Р – "Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр"

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристике классификации Р					$\sum_{i=1}^n R_{iPn}$
		Открытый 	Полузакрытый 	Закрытый сверху 	Закрытый 	4-х валковый 	
1	Стабильность формоизменения	2	3	1	3	4	13
2	Образование дефектов	2	3	1	3	4	13
3	Износ	2	3	1	3	4	13
4	Сложность настройки	2	3	1	5	4	15
5	Переточка валков	2	3	1	3	4	13
6	Использование бочки валков	2	2	1	2	3	10
7	Начальный диаметр валков	2	1	1	1	3	8
8	Глубина вреза валков	2	1	1	1	3	8
9	Валковая арматура	2	3	1	3	4	13
10	Ширина буртов	2	3	1	3	4	13
11	Усилие прокатки	2	3	1	3	4	13
12	Воздействие на валковую арматуру	2	3	1	3	4	13
13	Мощность прокатки	2	3	1	3	4	13
14	Расход воды	1	1	1	1	1	5

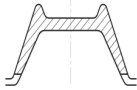
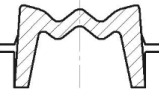
Числовые значения рангов, указанные в таблицах 3.15–3.18, соответствуют экспертным представлениям автора работы. Для получения более объективных

значений ранговых показателей требуется проведение специального исследования, включающего охват мнений максимально большого числа экспертов и статистическую обработку результатов опроса в соответствии с известными методиками [147].

Для каждого из показателей эффективности, при разных значениях характеристики классификации j , сумма принятых рангов может отличаться. Поэтому, для исходного выравнивания влияния показателей эффективности на значение формируемой целевой функции, полученные ранги R_{ijn} нормированы в соответствии с формулой (3.6).

В результате такого пересчета все ранги принятые для конкретных уровней варьирования характеристик по каждому показателю эффективности примут нормированные ранговые значения r_{ijn} , каждое из которых находится в диапазоне значений $0 < r_{ijn} \leq 1$. Результаты нормирования представлены в таблицах 3.19–3.22.

Таблица 3.19 – Нормированные ранговые значения калибров r_{ijn} по характеристике классификации С – "Вид стенки"

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристики классификации С			
		прямая 	вырезная 	изогнутая 	волнистая 
1	2	3	4	5	6
1	Стабильность формоизменения	0,375	0,125	0,250	0,250
2	Образование дефектов	0,375	0,125	0,250	0,250
3	Износ	0,375	0,125	0,250	0,250
4	Сложность настройки	0,333	0,333	0,167	0,167
5	Переточка валков	0,286	0,143	0,286	0,286
6	Использование бочки валков	0,111	0,333	0,222	0,333

Продолжение таблицы 3.19

1	2	3	4	5	6
7	Начальный диаметр валков	0,250	0,250	0,250	0,250
8	Глубина вреза валков	0,250	0,250	0,250	0,250
9	Валковая арматура	0,333	0,333	0,167	0,167
10	Ширина буртов	0,250	0,250	0,250	0,250
11	Усилие прокатки	0,222	0,111	0,333	0,333
12	Воздействие на валковую арматуру	0,222	0,111	0,333	0,333
13	Мощность прокатки	0,222	0,111	0,333	0,333
14	Расход воды	0,250	0,250	0,250	0,250

Таблица 3.20 – Нормированные ранговые значения калибров r_{ijn} по характеристике классификации Д – "Вид действительных фланцев"

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристики классификации Д				
		прямые с малым уклоном 	прямые с увеличенным уклоном 	изогнутые 	без уклона 	с двойным уклоном 
1	2	3	4	5	6	7
1	Стабильность формоизменения	0,231	0,231	0,077	0,308	0,154
2	Образование дефектов	0,067	0,133	0,200	0,333	0,267
3	Износ	0,067	0,133	0,200	0,333	0,267
4	Сложность настройки	0,231	0,231	0,077	0,308	0,154
5	Переточка валков	0,067	0,133	0,200	0,333	0,267

Продолжение таблицы 3.20

1	2	3	4	5	6	7
6	Использование бочки валков	0,333	0,267	0,133	0,067	0,200
7	Начальный диаметр валков	0,067	0,133	0,200	0,333	0,267
8	Глубина вреза валков	0,067	0,133	0,200	0,333	0,267
9	Валковая арматура	0,231	0,231	0,077	0,308	0,154
10	Ширина буртов	0,286	0,143	0,071	0,286	0,214
11	Усилие прокатки	0,333	0,267	0,133	0,067	0,200
12	Воздействие на валковую арматуру	0,333	0,267	0,133	0,067	0,200
13	Мощность прокатки	0,333	0,267	0,133	0,067	0,200
14	Расход воды	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200

Таблица 3.21 – Нормированные ранговые значения калибров r_{ijn} по характеристике классификации Л – "Вид ложных фланцев"

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристике классификации Л		
		треугольные 	трапецевидные 	без ложных фланцев 
1	2	3	4	5
1	Стабильность формоизменения	0,250	0,250	0,500
2	Образование дефектов	0,167	0,333	0,500
3	Износ	0,250	0,250	0,500
4	Сложность настройки	0,250	0,250	0,500
5	Переточка валков	0,250	0,250	0,500

Продолжение таблицы 3.21

1	2	3	4	5
6	Использование бочки валков	0,333	0,333	0,333
7	Начальный диаметр валков	0,333	0,333	0,333
8	Глубина вреза валков	0,250	0,250	0,500
9	Валковая арматура	0,333	0,333	0,333
10	Ширина буртов	0,333	0,333	0,333
11	Усилие прокатки	0,400	0,400	0,200
12	Воздействие на валковую арматуру	0,400	0,400	0,200
13	Мощность прокатки	0,400	0,400	0,200
14	Расход воды	0,333	0,333	0,333

Таблица 3.22 – Нормированные ранговые значения калибров r_{ijn} по характеристике классификации Р – "Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр"

i	Показатель эффективности	Уровень n характеристике классификации Р				
		Открытый	Полузакрытый	Закрытый сверху	Закрытый	4-х валковый
						
1	2	3	4	5	6	7
1	Стабильность формоизменения	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
2	Образование дефектов	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
3	Износ	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
4	Сложность настройки	0,133	0,200	0,067	0,333	0,267

Продолжение таблицы 3.22

1	2	3	4	5	6	7
5	Переточка валков	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
6	Использование бочки валков	0,200	0,200	0,100	0,200	0,300
7	Начальный диаметр валков	0,250	0,125	0,125	0,125	0,375
8	Глубина вреза валков	0,250	0,125	0,125	0,125	0,375
9	Валковая арматура	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
10	Ширина буртов	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
11	Усилие прокатки	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
12	Воздействие на валковую арматуру	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
13	Мощность прокатки	0,154	0,231	0,077	0,231	0,308
14	Расход воды	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200

3.5.1.1 Обоснованный подход к назначению рангов

Использование экспертного подхода при назначении рангов не исключает возможность получения ошибочного результата, даже при учете мнения большого числа экспертов и соответствующих процедур статистической обработки данных мнений. Для повышения надежности назначения ранговых показателей R_{ijn} можно воспользоваться специальными расчетными методами, основанными на закономерностях, отражающих объективное, физическое влияние характеристик калибров на рассматриваемые частные показатели. В качестве примера обоснованного подхода приведено назначение рангов по характеристике классификации Р – "Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр" применительно к частному показателю эффективности калибра "Стабильность формоизменения".

Стабильное формоизменение, в первую очередь, определяется степенью контроля калибром прокатываемого металла, величиной характеризующей отношение максимальной глубины вреза в один из валков к высоте полки профиля швеллера:

$$S_k = \frac{h_{вр}}{h_{пр}} \quad (3.7)$$

На рисунке 3.19, а изображен закрытый калибр (уровень варьирования характеристики – P1).

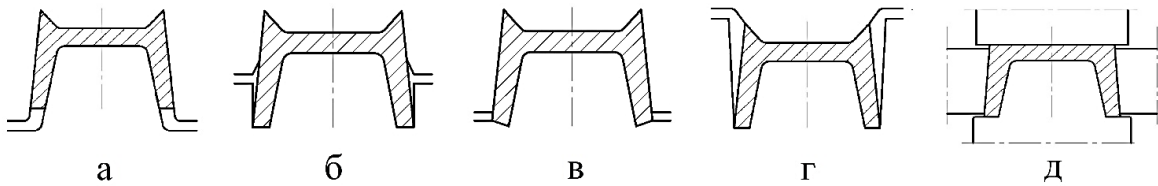


Рисунок 3.19 – Швеллерные калибры: а – закрытый; б – открытый; в – полузакрытый; г – закрытый сверху; д – четырех валковый [122]

Как видно из схемы, профиль полностью находится в верхнем ручье, т.е. $h_{вр} > h_{пр}$ следовательно S_k больше 1:

$$S_k = \frac{h_{вр}}{h_{пр}} > 1.$$

На рисунке 3.19, б изображен открытый калибр (уровень варьирования характеристики – P2).

Учитывая, что высота профиля $h_{пр}$ и то, что разъем калибра находится примерно по середине [28], то глубина вреза верхнего валка будет составлять $0,5h_{пр}$. Тогда:

$$S_k = \frac{h_{вр}}{h_{пр}} = \frac{0,5h_{пр}}{h_{пр}} = 0,5.$$

Разъем полузакрытого калибра, приведенного на рисунке 3.19, в (уровень варьирования характеристики – P3) принимают на 7...20 мм от конца полки в зависимости от номера швеллера, т. е. чем больше номер, тем большее расстояние нужно принимать [28].

Рассчитаем степень контроля для наименьшей и наибольшей высот профиля швеллера.

Наименьшая высота профиля швеллера $h_{\text{пр.наим}} = 50$ мм [8], тогда глубина вреза в верхний валок составит $h_{\text{вр.наим}} = h_{\text{пр.наим}} - 7 = 43$ мм. Степень контроля составит:

$$S_{\text{к}} = \frac{h_{\text{вр.наим}}}{h_{\text{пр.наим}}} = \frac{43}{50} = 0,86.$$

Наибольшая высота профиля швеллера $h_{\text{пр.наиб}} = 400$ мм [8], тогда глубина вреза в верхний валок составит $h_{\text{вр.наиб}} = h_{\text{пр.наиб}} - 20 = 380$ мм. Степень контроля составит:

$$S_{\text{к}} = \frac{h_{\text{вр.наиб}}}{h_{\text{пр.наиб}}} = \frac{380}{400} = 0,95.$$

Таким образом, наилучшая степень контроля в полузакрытых калибрах находится в интервале 0,86...0,95.

На рисунке 3.19, г изображен закрытый сверху калибр (уровень варьирования характеристики – Р4).

Как видно из схемы, профиль полностью находится в нижнем валке, т.е. $h_{\text{вр}} > h_{\text{пр}}$ следовательно $S_{\text{к}}$ больше 1:

$$S_{\text{к}} = \frac{h_{\text{вр}}}{h_{\text{пр}}} > 1.$$

На рисунке 3.19, д представлен четырех валковый калибр (уровень варьирования характеристики – Р5).

Из рисунка видно, что высота валков, находящаяся в контакте с профилем $h_{\text{вр}}$, немного меньше высоты самого профиля $h_{\text{пр}}$, следовательно:

$$S_{\text{к}} = \frac{h_{\text{вр}}}{h_{\text{пр}}} < 1.$$

Проводя специальные исследования, можно перевести и другие оценки показателей эффективности из таблицы 3.1 из экспертно назначаемых ранговых величин в физически обоснованные числовые величины, что повысит объективность целевой функции Q (3.2).

Возможен также смешанный режим использования и физически обоснованных и ранговых оценок при формировании целевой функции Q (3.2). Наиболее простым способом такого смешанного формирования целевой функции Q является перевод полученных числовых значений в соответствующие им ранги. Пример такого перевода для рассмотренного выше характеристики классификации P – "Тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр" применительно к частному показателю эффективности калибра "Стабильность формоизменения" приведен в таблице 3.23.

Таблица 3.23 – Перевод численных значений в ранги

	открытый	полузакрытый	закрытый сверху	закрытый	4-х валковый
числовое значение	0,5	0,86...0,95	больше 1	больше 1	чуть меньше 1
ранг	3	2	1	1	2

3.6 Правило выбора оптимальной схемы калибровки

Значение целевой функции рассчитывается для каждой виртуальной схемы швеллерной калибровки, входящей в первое пространство оптимизации (пространство схем калибровок). Оптимальной считается та калибровка, которая обладает наибольшим значением целевой функции $Q_{ск}$ (3.2) ($Q_{ск} \rightarrow \max$).

3.7 Оптимальная схема швеллерной калибровки

В результате выполнения первого этапа оптимизации будет получена оптимальная схема швеллерной калибровки валков для прокатки швеллера

определенного номера и типа для производства на конкретном прокатном стане (модуль 3.7).

3.8 Второй этап оптимизации. Постановка цели оптимизации режима обжатий

В соответствии с принятой универсальной «Концепцией двухэтапной оптимизации калибровки» (см. главу 2), на втором этапе оптимизации производится поиск наилучшего (оптимального) распределения обжатий металла по проходам с использованием выявленной на первом этапе и описанной выше оптимальной схемой калибровки. Процедура поиска оптимального режима обжатий может быть представлена в виде модели, включающей в свой состав 11 информационных модулей. На рисунке 3.20 указаны состав, взаимные связи и строгая последовательность формирования этих модулей. Для получения оптимального режима обжатий необходимо четко структурировать и сформировать каждый из них.

Аналогично п. 3.1, первым шагом на пути поиска оптимального режима обжатий, является определение цели оптимизации режима обжатий (модуль 3.8).

Как указывалось ранее, задача отыскания оптимальной калибровки является многоцелевой, многокритериальной задачей. При рассмотрении возможностей оптимизации схемы швеллерной калибровки был использован ряд важных показателей эффективности калибровки, приведенных в таблице 3.1, и учтенных при формировании целевой функции Q (3.2). В принципе, эти же показатели могут быть использованы и в качестве частных целей при оптимизации режима обжатий. Однако, использование двухэтапной оптимизации имеет свое преимущество в том, что дает возможность достижения и других целей на втором этапе поиска оптимальной калибровки. Используем такую возможность.

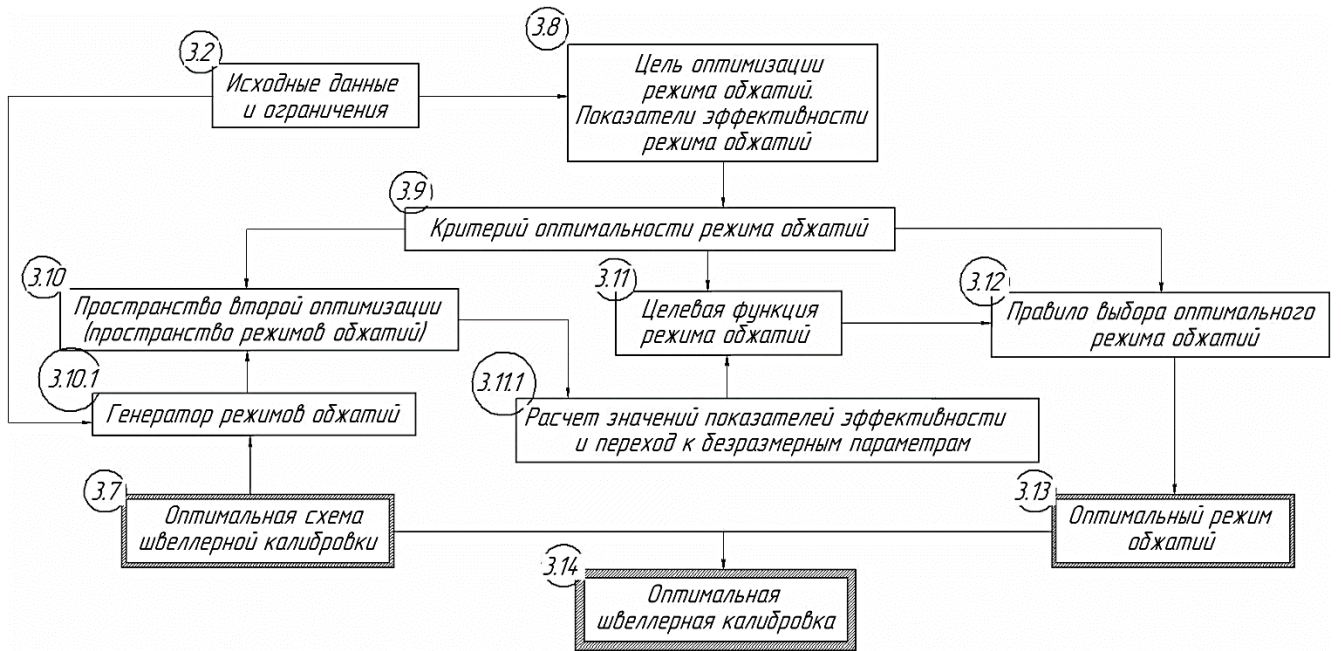


Рисунок 3.20 – Блок-схема модели второго этапа оптимизации швеллерной калибровки – оптимизация режима обжати

В таблице 3.24 указан перечень показателей эффективности режима обжати. Каждый показатель эффективности отражает одну из возможных целей оптимизации режима обжати.

Как и при выборе показателей эффективности схемы калибровки, так и при выборе показателей эффективности режима обжати e_j учесть все показатели эффективности невозможно. В работе представлены лишь основные из них, по мнению автора, важнейшие. Общее количество выбранных показателей и их смысл никак не влияет на суть рассматриваемого ниже критерия оптимальности.

В реальной практике каждый из выбранных показателей эффективности имеет различную приоритетность – достижение каких-то целей может быть намного более значимо, чем достижение других. Для учета этого обстоятельства каждому выбранному показателю эффективности экспертно присваивается коэффициент влияния e_j , таким образом, чтобы выполнялось условие нормирования:

$$\sum_{i=1}^{n_{po}} |e_j| = 1, \quad (3.9)$$

где n_{po} – количество показателей эффективности режима обжати.

В таблице 3.24 указаны знаки коэффициентов влияния e_j , назначенные так, чтобы обеспечить однонаправленное изменение рассмотренной ниже обобщенной многокритериальной целевой функции режима обжатий Q_{po} . Причем, система знаков принята таким образом, чтобы обеспечить уменьшение значения целевой функции Q_{po} при приближении показателя эффективности к целевому значению. Т.е., под оптимумом целевой функции режима обжатий будем понимать минимум ($Q_{po} \rightarrow \min$). (В отличие от критерия оптимальности схемы калибровки, где под оптимумом понимался максимум целевой функции, $Q_{ск} \rightarrow \max$).

Таблица 3.24 – Показатели эффективности калибров f_i входящие в целевую функцию критерия оптимальности режимов обжатий

№	Наименование показателя	Характеристика показателя	Целевое значение	Знаки коэффициентов влияния, e_j
1	2	3	4	5
1	Коэффициент загрузки рабочей клетки по усилию прокатки	Чем меньше значение и чем равномерней распределены по проходам усилие прокатки, момент прокатки и мощность, тем меньше энергии уходит на производство единицы продукции.	Min	+
2	Коэффициент загрузки электродвигателя по крутящему моменту		Min	+
3	Производительность прокатного стана	Чем больше готового продукта производится в единицу времени, тем меньше себестоимость данного продукта	Max	-

Продолжение таблицы 3.24

1	2	3	4	5
4	Расход электроэнергии на весь цикл прокатки	От расхода энергии зависит себестоимость готового продукта	Min	+
5	Температура конца прокатки	Чем меньше падение температуры за весь процесс, тем ниже можно принять температуру нагрева заготовки, тем ниже расход топлива	Max	-

3.9 Критерий оптимальности режима обжатий

В понятие "критерий оптимальности режима обжатий" входят:

- пространство второй оптимизации (модуль 3.10),
- целевая функция режима обжатий (модуль 3.11),
- правило выбора оптимального режима обжатий (модуль 3.12).

3.10 Пространство второй оптимизации. Пространство режимов обжатий

Пространство режимов обжатий включает в себя все возможные режимы обжатий для конкретной оптимальной схемы швеллерной калибровки, выбранной на первом этапе оптимизации (модуль 3.7).

Суть и ограничения пространства режимов обжатий подробно описаны в разделе 2.3.

3.10.1 Генератор режимов обжатий

Из двух возможных типов, описанных в п. 2.3, для реализации использован первый подход – создание индивидуального «Генератора режима обжатий швеллерной калибровки». Как описывалось в п.2.3, в качестве генератора режима обжатий используется метод выпуклого программирования – метод Гаусса–

Зейделя. Более удобно и логически правильно провести совместное рассмотрение генератора режимов обжатый и правила выбора оптимального режима обжатый, представленное в п. 3.12.

3.11 Целевая функция режима обжатый

Блок-схема расчета значения целевой функции режима обжатый представлена на рисунке 3.21.



Рисунок 3.21 – Блок-схема расчета значения целевой функции критерия оптимальности режима обжатый

Значение целевой функции Q_{po} для выбранного режима обжатый складывается из значений частных показателей эффективности с учетом коэффициентов влияния e_j и их знаков (таблица 3.24):

$$Q_{po} = \sum_{j=1}^{n_{po}} e_j \cdot f_j, \quad (3.10)$$

где f_j – частный показатель эффективности режима обжатый

3.11.1 Расчет частных показателей эффективности

Расчет значения частных показателей эффективности f_j (где j – номер показателя эффективности) осуществляется по нижеприведенным формулам.

Для усилия прокатки и момента прокатки расчет частного показателя эффективности осуществляется принципиально одинаково:

$$\begin{aligned} f_P &= \max |K_{P_i} - K_{P_{сп}}|, \\ f_M &= \max |K_{M_i} - K_{M_{сп}}|, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где K_{Pi} и K_{Mi} – коэффициенты загрузки клеток по силе прокатки и крутящему моменту прокатки, соответственно; K_{Pcp} и K_{Mcp} – их средние значения.

Эти показатели эффективности характеризуют уровень максимальной загрузки оборудования в отдельных проходах по сравнению со средним уровнем его загрузки во всех проходах (который определяется, прежде всего, соотношением размеров исходной заготовки и готового профиля, нагревом, оборудованием и технологией, а также количеством проходов прокатки). Наилучший вариант работы оборудования стана будет соответствовать наиболее равномерной загрузке клеток стана по этим показателям по проходам. Поэтому в качестве целевого значения и выбрано максимальное значение коэффициента загрузки, которое в процессе оптимизации следует минимизировать (принцип "минимакса").

Для выявления эффективности калибровки по производительности и энергозатратам, и сопоставления различных вариантов калибровок, применим следующие безразмерные показатели:

$$f_{\Pi} = \frac{\Pi_{\Sigma \text{новой калибровки}}}{\Pi_{\Sigma \text{заводской калибровки}}}, \quad (3.12)$$

$$f_W = \frac{W_{\Sigma \text{новой калибровки}}}{W_{\Sigma \text{заводской калибровки}}},$$

где $\Pi_{\Sigma \text{новой калибровки}}$ и $\Pi_{\Sigma \text{заводской калибровки}}$ – производительность новой калибровки и заводской, соответственно, т/год; $W_{\Sigma \text{новой калибровки}}$ и $W_{\Sigma \text{заводской калибровки}}$ – энергозатраты на производство одной тонны проката по новой и заводской калибровкам, соответственно, кДж/т.

Весьма важной характеристикой технологии горячей прокатки является температура конца прокатки, определяющая многое – уровень свойств готового проката, затраты электроэнергии, износ инструмента, возможности термообработки в потоке и т.д. Температура конца прокатки зависит от температуры нагрева заготовки и потерь тепла при прокатке. При одной и той же

температуре нагрева, используя разные калибровки и разные режимы обжатий, можно влиять на температуру конца прокатки как за счет различных форм и размеров остывающих промежуточных полос, так и за счет различного уровня их деформационного разогрева. А задавшись температурой конца прокатки, за счет разных калибровок и деформаций, можно минимизировать температуру нагрева с получением известных преимуществ. Поэтому, безразмерное значение частного показателя эффективности будем находить по формуле:

$$f_T = \frac{T_{\text{конца прокатки}}}{T_{\text{нагрева заготовки}}}, \quad (3.13)$$

где $T_{\text{конца прокатки}}$ и $T_{\text{нагрева заготовки}}$ – температуры конца прокатки и нагрева заготовки, соответственно, °С.

В отличие от показателей эффективности схемы калибровки, числовые характеристики которых выявляются экспертными методами, показатели эффективности режима обжатий f_j (таблица 3.24) можно рассчитать аналитически, используя "конструктивную модель процесса прокатки в швеллерных калибрах", изложенную ниже в зависимости от значений коэффициентов обжатий по стенке профиля швеллера. Необходимость использования экспертного ранжирования в данном случае отсутствует.

Однако, показатели эффективности режима обжатий, приведенные в таблице 3.24, имеют различные размерности, поэтому, для использования их при вычислении целевой функции согласно схеме, показанной на рисунке 3.21, целесообразно привести их к безразмерному нормированному виду.

Переход от усилия прокатки к безразмерному параметру – коэффициенту загрузки рабочей клетки по силе прокатки K_P , осуществляется по формуле:

$$K_P = \frac{P_i}{[P]_i}, \quad (3.14)$$

где i – номер прохода.

Номинальный момент прокатки определяется по формуле:

$$M_H = \frac{N_H}{\omega_H}, \quad (3.15)$$

где ω – номинальная угловая скорость вращения валков.

Переход момента прокатки к безразмерному параметру – коэффициенту загрузки рабочей клетки по моменту прокатки K_M , осуществляется по формуле:

$$K_M = \frac{M_{ij}}{M_{H_j}}. \quad (3.16)$$

3.12 Правило и процедура выбора оптимального режима обжатий

Целевая функция Q_{po} построена на ограниченном пространстве режимов обжатий $H \left(\frac{1}{\eta_1}, \frac{1}{\eta_2}, \dots, \frac{1}{\eta_{n_{np}}} \right)$ и является выпуклой (нелинейной) функцией координат этого пространства (п. 2.3). Наилучшим (оптимальным) режимом обжатий $H_{оп} \left(\left(\frac{1}{\eta_1} \right)_{оп}, \left(\frac{1}{\eta_2} \right)_{оп}, \dots, \left(\frac{1}{\eta_{n_{np}}} \right)_{оп} \right)$ будет являться тот режим, который обеспечит минимум целевой функции Q_{po} .

Задача поиска минимум функции Q_{po} , принципиально может быть решена при помощи использования методов аналитического исследования этой функции на экстремум. Но в рамках решаемой задачи выразить в явном виде зависимость $Q_{po} = F \left(H \left(\frac{1}{\eta_1}, \frac{1}{\eta_2}, \dots, \frac{1}{\eta_{n_{np}}} \right) \right)$ не удастся в связи со сложностью выражения показателей эффективности f_j как составляющих целевой функции Q_{po} . (3.2).

Другом способом отыскания $H_{оп} \left(\left(\frac{1}{\eta_1} \right)_{оп}, \left(\frac{1}{\eta_2} \right)_{оп}, \dots, \left(\frac{1}{\eta_{n_{np}}} \right)_{оп} \right)$ является применение численных методов, а именно выпуклого программирования. В данном случае наиболее подходящим, простым и удобным является метод Гаусса–Зейделя или метод покоординатного поиска (п. 2.3).

Алгоритм поиска оптимального режима обжатий:

1. В качестве начальной точки H_0 выбирают точку с координатами, соответствующими средним значениям коэффициентов обжатия по стенке профиля швеллера, рассчитываемого по формуле:

$$\frac{1}{\eta_{\text{cp}}} = \frac{\frac{1}{\eta_{\text{max}}} + \frac{1}{\eta_{\text{min}}}}{2}. \quad (3.17)$$

2. Значения $\frac{1}{\eta_{\text{min}}}$ и $\frac{1}{\eta_{\text{max}}}$ определены в п. 3.2.
3. Осуществляется проверка средних коэффициентов обжатия по стенке, таким образом, чтобы их произведение равнялось суммарному коэффициенту обжатия ($\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{d_0}{d_{n_{\text{np}}}}$). Если равенство $\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i}$ не выполняется, то необходимо каждый коэффициент обжатия умножить на коэффициент неувязки c :

$$c = \sqrt[n_{\text{np}}]{\frac{\frac{1}{\eta_{\Sigma}}}{\frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{1}{\eta_2} \cdot \dots \cdot \frac{1}{\eta_{n_{\text{np}}}}}}. \quad (3.18)$$

4. Выбирают одну из координат $\frac{1}{\eta_i}$.
5. Используя один из методов одномерного поиска (например, шаговый метод, метод последовательной дихотомии и т. п.), отыскивают частный экстремум (минимум) функции $Q_{\text{po}}^{\text{оп}} \Big|_{\frac{1}{\eta_i}}$.
6. Сравнивают значение частного экстремума функции $Q_{\text{po}}^{\text{оп}} \Big|_{\frac{1}{\eta_i}}$ со значением $Q_{\text{po}}^{\text{оп}} \Big|_{\frac{1}{\eta_{i-1}}}$, рассчитанным на предыдущем шаге ($i-1$) (для первого расчета

просто запоминают). Если оказывается, что $\Delta Q = \left| Q_{\text{po}}^{\text{оп}} \Big|_{\frac{1}{\eta_i}} - Q_{\text{po}}^{\text{оп}} \Big|_{\frac{1}{\eta_{i-1}}} \right| \leq \delta$, где

δ – заданная точность расчета, то за искомую точку глобального экстремума принимают либо точку предыдущего частного экстремума, рассчитанную на шаге $(i-1)$, либо точку текущего частного экстремума (при $Q_{po}^{оп} \Big|_{\frac{1}{\eta_i}} > Q_{po}^{оп} \Big|_{\frac{1}{\eta_{i-1}}}$).

7. Если условие $\Delta Q = \left| Q_{po}^{оп} \Big|_{\frac{1}{\eta_i}} - Q_{po}^{оп} \Big|_{\frac{1}{\eta_{i-1}}} \right| \leq \delta$ не выполняется, то выбирают

следующую координату пространства оптимизации $\frac{1}{\eta_i}$ и переходят к

выполнению п. 3 алгоритма. При этом если значение частного экстремума отлично от исходного значения коэффициента обжатия по первой координате $\frac{1}{\eta_i}$, то в связи с необходимостью выполнять условие:

$\prod_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$, необходимо осуществить пересчет других коэффициентов

обжатия умножив каждое из них на коэффициент выравнивания k :

$$k = \sqrt[n_{np}-1]{\frac{\frac{1}{\eta_{\Sigma}}}{\left(\frac{1}{\eta_1}\right)_{ч.э.} \cdot \frac{1}{\eta_2} \cdot \dots \cdot \frac{1}{\eta_{n_{np}}}}}, \quad (3.19)$$

где $\left(\frac{1}{\eta_1}\right)_{ч.э.}$ – значение частного экстремума по первой координате

3.13 Оптимальный режим обжатий

По завершении второго этапа оптимизации удается отыскать оптимальный режим обжатий (модуль 3.13) для выбранной на первом этапе оптимальной схемы калибровки (модуль 3.7), т. е. **удается выявить оптимальную калибровку** (модуль 3.14).

3.14 Выводы по главе 3

- 1) Рассмотренная в главе 2 универсальная «Концепция двухэтапной оптимизации калибровки» адаптирована для поиска оптимальной швеллерной калибровки валков.
- 2) Сформирован критерий оптимальности схемы калибровки (первый критерий).
 - Для формирования многоцелевой функции критерия оптимальности схемы калибровки выделено 14 показателей эффективности, каждый из которых отражает одну из возможных целей оптимизации.
 - Сформировано пространство швеллерных калибров, включающее в себя все известные и вновь разработанные виды швеллерных калибров.
 - С помощью разработанного генератора схемы калибровки и пространства швеллерных калибров удается сформировать первое пространство оптимизации – пространство схем швеллерных калибровок. Причем, вид этого пространства будет зависеть от конкретных производственных условий: номера прокатываемого профиля, используемой заготовки, особенностей прокатного стана и технологии и т.п.
 - Разработан алгоритм поиска значения целевой функции для каждой схемы калибровки, входящей в данное пространство. Сформулировано правило выбора оптимальной схемы калибровки.
- 3) Сформирован критерий оптимальности режимов обжатий.
 - Предложен новый способ представления режима обжатий как точки непрерывного ограниченного многомерного пространства обжатий в проходах. Это пространство содержит в себе все виртуальные режимы обжатий и является пространством второй оптимизации.
 - Предложен принцип формирования целевой функции критерия оптимальности, интегрирующей частные показатели эффективности

режима обжатий. Выделено 5 частных показателей эффективности режима обжатий.

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

4) Детально проработана и доведена до рабочих алгоритмов универсальная двухэтапная процедура поиска оптимальной калибровки валков для прокатки любого швеллера на любом прокатном стане, обладающей как оптимальной схемой калибровки, так и оптимальным распределением обжатий по проходам.

Для проведения оптимизации по предложенной модели необходима компьютерная реализация, которая позволит сформировать полные пространства схем швеллерных калибровок и режимов обжатий, а также выбрать оптимальное решение по представленным алгоритмам.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРА 24У В УСЛОВИЯХ РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

4.1 Конструктивная модель процесса прокатки швеллеров

Для расчета необходимых характеристик процесса прокатки швеллеров с целью последующего формирования показателей эффективности и целевых функций критериев оптимальности необходимо сформулировать следующие специальные универсальные расчетные модели (алгоритмы):

1. Модель расчета размеров калибров и формоизменения;
2. Модель расчета энергосиловых параметров.

Исходными данными для расчетов являются:

1. Чертеж готового профиля;
2. Чертеж заготовки (если заготовка задана и не подлежит расчету);
3. Схема калибровки (выявленная на первом этапе оптимизации в виде последовательности калибров с определенными кодами);
4. Общее количество калибров в калибровке – N_k ;
5. Число швеллерных калибров в калибровке – $n_{кш}$;
6. Число контрольных калибров в калибровке – n_k ;
7. Номер калибра в калибровке n ;
8. Код калибра – K_k ;
9. Тип калибра (определен в схеме калибровки в виде конкретного кода калибра);
10. Числовые значения коэффициентов обжатия по шейке в каждом калибре $\left(\frac{1}{\eta_{ст}}\right)_i$ (задается в процессе поиска оптимального режима обжатий);
11. Межосевое расстояние валков используемой прокатной клетки.
12. Марка прокатываемой стали;
13. Начальная температура прокатки – t_0 ;

14. Частота вращения валков.

Учитывая большое количество работ, посвященных швеллерной калибровке и обширность решаемой задачи оптимизации, в качестве основы для формирования таких моделей используются известные из литературы закономерности [18–20, 46, 61–69, 77].

4.1.1 Модель расчета размеров калибров и формоизменения в них

Модель расчета размеров калибров – алгоритм, позволяющий рассчитать все размеры каждого элемента каждого конкретного калибра и полосы, прокатанной в нем при заданном режиме обжатий.

Алгоритмы расчета размеров калибров, известные из литературы, довольно заметно отличаются в зависимости от типа рассматриваемого калибра, определяемого нами выше системой кодировки (см. п. 3.4.1).

В большинстве случаев, расчет калибровки производят против хода прокатки, начиная с чистового калибра. В данной работе расчет осуществляется так же против хода прокатки.

Расчет размеров чистового калибра основан на использовании горячих размеров профиля, выходящего с прокатного стана. Кроме температурного расширения металла, при расчете учитывают износ валков и поля допусков на размеры готового профиля по чертежу. Процедура расчета размеров горячего профиля произвольного типа подробно описана в [19, с. 11] и может быть применена и для расчета чистового швеллерного калибра.

Расчет размеров формообразующих калибров осуществляется по известным методикам расчета Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова [61, 62] и В. К. Смирнова, В. А. Шилова и Ю. В. Инатовича [19]. Исключение составляет расчет длины действительного фланца l_{ϕ} в калибрах развернутого типа с двойным уклоном полок (рисунок 4.1).

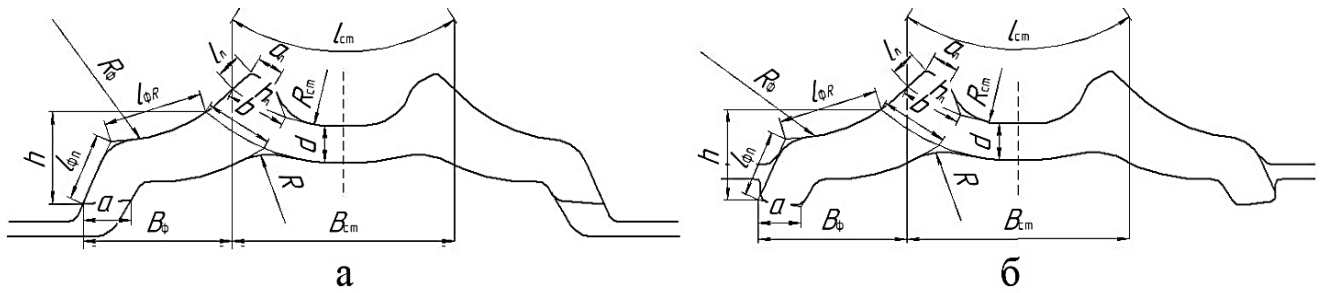


Рисунок 4.1 – Калибр развернутого типа с двойным уклоном полок: а – формообразующий; б – контрольный

В таких калибрах $\frac{2}{3}$ длины действительного фланца выполняют радиусом R_ϕ , а $\frac{1}{3}$ выполняют прямолинейно с выпуском 10–15 %.

- Для контрольного калибра длина фланца определяется по формуле:

$$l'_\phi = \frac{l_\phi}{e_\phi + 1}. \quad (4.1)$$

- Длина действительного фланца, выполненная радиусом:

$$l'_{\phi R} = \frac{2l_\phi}{3(e_\phi + 1)}. \quad (4.2)$$

- Длина прямолинейной части действительного фланца:

$$l'_{\phi\Pi} = \frac{l_\phi}{3(e_\phi + 1)}. \quad (4.3)$$

- Для формообразующего калибра длина фланца рассчитывается по формуле:

$$l'_\phi = \left(\frac{1}{\eta_{\text{выс.к}}} \right) l_\phi. \quad (4.4)$$

- Длина действительного фланца, выполненная радиусом:

$$l'_{\phi R} = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{\eta_{\text{выс.к}}} \right) l_\phi. \quad (4.5)$$

- Длина прямолинейной части действительного фланца:

$$l'_{\phi\Pi} = \frac{l_\phi}{3} \left(\frac{1}{\eta_{\text{выс.к}}} \right). \quad (4.6)$$

- Высота действительного фланца для контрольных и формообразующих калибров:

$$h = l_{\phi R} \cdot \cos \varphi \cdot \delta H + l_{\phi n} \cdot \cos \varphi. \quad (4.7)$$

4.1.2 Модель расчета энергосиловых параметров прокатки

Расчет энергосиловых параметров осуществляется по известным методикам, изложенных в [19, 27, 61, 63–67].

4.2 Совершенствование калибровки валков для прокатки швеллера 24У

Практическое применение разработанной модели концепции двухэтапной оптимизации калибровки продемонстрируем на примере поиска оптимальной калибровки для швеллера 24У производимого в рельсобалочном цехе (РБЦ) ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (далее по тексту "заводская" технология).

Основные размеры швеллера 24У представлены на рисунке 4.2.

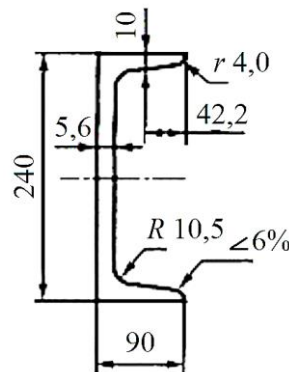


Рисунок 4.2 – Основные размеры швеллера 24У по ГОСТ 8240–97 [8] и ТИ [148]

РБЦ включает в свой состав рельсобалочный стан 800, предназначенный для производства товарной заготовки, рельсов разных типов и большой группы сортовых профилей как общего, так и специального назначения.

4.2.1 Характеристика рельсобалочного стана 800

На рисунке 4.3 представлена схема рельсобалочного стана 800 линейного типа ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Проектная мощность данного стана составляет 700 тыс. т. [148]

Стан 800 расположен в две линии. Линия обжимной клетки включает: реверсивную двухвалковую клетку 950 с приводом через шестеренную клетку от 6,4 МВт электродвигателя. Линия черновой, предчистойвой и чистой клетки включает: черновую и предчистовую трехвалковые клетки 800 с общим приводом через шестеренную клетку от 8 МВт электродвигателя; чистовую нереверсивную двухвалковую клетку 800 с приводом через шестеренную клетку от 3,2 МВт электродвигателя.

От печи к обжимной клетке нагретые заготовки транспортируют по подводющему рольгангу длиной 26,4 м со скоростью до 2,0 м/с. Температура металла в конце прокатки на клетке 950 для швеллеров должна быть не ниже 1100 °С.

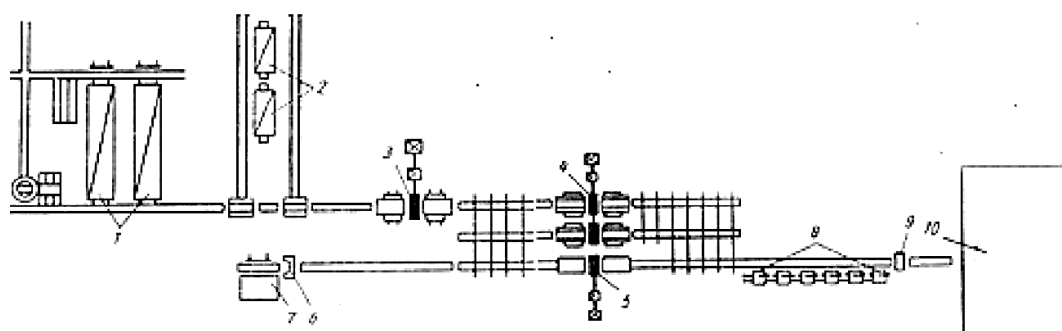


Рисунок 4.3 – Схема расположения основного технологического оборудования рельсобалочного стана 800: 1 – методические нагревательные печи; 2 – камерные нагревательные печи; 3 – обжимная двухвалковая клетка 950; 4 – черновая и предчистовая трехвалковые клетки 800; 5 – чистовая клетка 800; 6 – ножницы горячей резки; 7 – стеллаж возвратного потока; 8 – салазковые пилы горячей резки; 9 – клеймовочная машина; 10 – отделочное оборудование и склад для хранения металлопроката [149]

Черновая и предчистовая реверсивные клетки снабжены с обеих сторон подъемно-качающими столами. Каждый стол имеет кантователь, два манипулятора с гидравлическим приводом и транспортный рольганг (скорость транспортировки до 2,5 м/с). Раскатные поля оборудованы рольгангами и цепными шлепперами. Температура начала прокатки в черновой клетке 800 поддерживают более 1020°С.

Чистовая клеть – двухвалковая 800. Перед чистой клетью установлен кантователь с приводом от электродвигателя. Температура конца прокатки на стане 800 не ниже 800 °С [148, 149].

Основные характеристики рабочих клетей и их приводов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики клетей, валков и приводов [148]


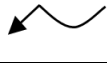
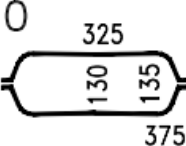
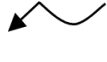
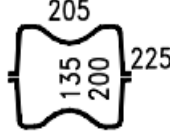




Показатель	Обжимная клеть	Черновая клеть	Предчистовая клеть	Чистовая клеть
Тип клетки	Дуо реверсивная	Трио нереверсивная	Трио нереверсивная	Дуо нереверсивная
Тип станины	Закрытая	Открытая	Открытая	Открытая/ Закрытая
Привод валков				
Тип	МП 8700–60	МПС 8000–100		МПС 3200–110
Номинальная мощность, кВт	6400	8000		3200
Скорость вращения валков, об/мин	0–60–120	0–110–200		0–110–230
Прокатные валки				
Длина бочки, мм	2300	1900		1200
Диаметр валков, мм	1005	850		850
Материал	Сталь 50 кованная	Сталь 60ХН кованная, чугун СПХН–45	Чугун СПХН–45, СШХНМ–42	Чугун СПХН–49, СШХНМ–45

4.2.2 Расчет характеристик заводской калибровки швеллера 24У

Прокатка швеллера 24У осуществляется на стане 800 рельсобалочного цеха из непрерывнолитой заготовки размерами 250×250 мм из стали марки СтЗкп по ГОСТ 380–2005 [15] нагреваемой до температуры 1260°С.

Согласно заводской схеме прокатки швеллера 24У в обжимной клетке 950, в калибрах II и III осуществляют по 2 прохода (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Схема прокатки швеллера 24У в обжимной клетке 950

Калибр	№ прох	Сечение		Обжатие	Показания стрелки
		Н	В		
		250	250		
		 270°			
	1	210	260	40	80
		 90°			
	2	175	210	85	40
					
	3	120		55	65
	4	85	215	35	30
					
	5	63		22	35
	6	28	215	35	0
	7	Холостой			

В ящичном калибре заготовку обжимают за один проход до размеров 210×260 мм.

Прокатка швеллера 24У осуществляется в 10 фасонных калибрах, показанных на рисунке 4.4.

Монтажные схемы валков представлены в приложении Г.

Таблица 4.3 – Параметры заводской калибровки швеллера 24У

№ калибра (против хода прокатки)	Код калибра	Наименование блока калибров	Номер прохода (против хода прокатки)	Коэффициент обжатия по стенке $\frac{1}{\eta_{ст}}$
1	1134	Чистовой	1	1,100
2	3224	Формообразующий	2	1,091
3	3222	Контрольный	3	1,167
4	3224	Формообразующий	4	1,143
5	3222	Контрольный	5	1,500
6	3224	Формообразующий	6	1,583
7	3224		7	1,474
8	1224		8	2,250
			9	1,349
9	1224	Формообразующий	10	1,412
			11	1,458
10	2121	Разрезной	12	1,486

Расчет значения целевой функции осуществляется согласно п. 3.5.

Как видно из таблицы 4.3, в заводской калибровке присутствуют по одному калибру с кодами 1134 и 2121 шесть калибров с кодом 3224, и по два калибра с кодами 3222 и 1224. Следовательно, для поиска значения целевой функции всей калибровки достаточно найти значения частного и общего показателей эффективности для калибров с этими пятью кодами.

В соответствии с методикой, изложенной в п. 3.5, из таблиц 3.15 – 3.18 для уровней варьирования соответствующих кодам калибров выбраны ранговые значения R_{ijn} экспертно назначенные для каждого показателя эффективности i в таблице 3.1 для всех характеристик классификации калибра $j \in \{C, Д, Л, Р\}$. В соответствии с правилом (3.6) проведено нормирование этих ранговых оценок.

В таблицах 4.4–4.5 представлены нормированные ранговые значения для выбранных в п. 3.5.1 показателей эффективности по уровням варьирования характеристики в соответствии с кодами калибров.

Таблица 4.4 – Нормированные ранги калибров r_{ijn} по уровням варьирования характеристик С, Д, Л, Р калибров с кодами – 1134, 3224, 3222

i	Показатель эффективности	1134				3224				3222			
		С1	Д1	Л3	Р4	С3	Д2	Л2	Р4	С3	Д2	Л2	Р2
1	Стабильность формоизменения	0,375	0,231	0,500	0,231	0,250	0,231	0,250	0,231	0,250	0,231	0,250	0,231
2	Образование дефектов	0,375	0,067	0,500	0,231	0,250	0,133	0,333	0,231	0,250	0,133	0,333	0,231
3	Износ	0,375	0,067	0,500	0,231	0,250	0,133	0,250	0,231	0,250	0,133	0,250	0,231
4	Сложность настройки	0,333	0,231	0,500	0,333	0,167	0,231	0,250	0,333	0,167	0,231	0,250	0,200
5	Переточка валков	0,286	0,067	0,500	0,231	0,286	0,133	0,250	0,231	0,286	0,133	0,250	0,231
6	Использование бочки валков	0,111	0,333	0,333	0,200	0,222	0,267	0,333	0,200	0,222	0,267	0,333	0,200
7	Начальный диаметр валков	0,250	0,067	0,333	0,125	0,250	0,133	0,333	0,125	0,250	0,133	0,333	0,125
8	Глубина вреза валков	0,375	0,067	0,500	0,125	0,250	0,133	0,250	0,125	0,250	0,133	0,250	0,125
9	Валковая арматура	0,375	0,231	0,333	0,231	0,250	0,231	0,333	0,231	0,250	0,231	0,333	0,231
10	Ширина буртов	0,375	0,286	0,333	0,231	0,250	0,143	0,333	0,231	0,250	0,143	0,333	0,231
11	Усилие прокатки	0,333	0,333	0,200	0,231	0,167	0,267	0,400	0,231	0,167	0,267	0,400	0,231
12	Воздействие на валковую арматуру	0,286	0,333	0,200	0,231	0,286	0,267	0,400	0,231	0,286	0,267	0,400	0,231
13	Мощность прокатки	0,111	0,333	0,200	0,231	0,222	0,267	0,400	0,231	0,222	0,267	0,400	0,231
14	Расход воды	0,250	0,200	0,333	0,200	0,250	0,200	0,333	0,200	0,250	0,200	0,333	0,200

Таблица 4.5 – Нормированные ранги калибров r_{ijn} по уровням варьирования характеристик С, Д, Л, Р калибров с кодами – 1224, 2121

i	Показатель эффективности	1224				2121			
		С1	Д2	Л2	Р4	С2	Д1	Л2	Р1
1	Стабильность формоизменения	0,375	0,231	0,250	0,231	0,125	0,231	0,250	0,154
2	Образование дефектов	0,375	0,133	0,333	0,231	0,125	0,067	0,333	0,154
3	Износ	0,375	0,133	0,250	0,231	0,125	0,067	0,250	0,154
4	Сложность настройки	0,333	0,231	0,250	0,333	0,333	0,231	0,250	0,133
5	Переточка валков	0,286	0,133	0,250	0,231	0,143	0,067	0,250	0,154
6	Использование бочки валков	0,111	0,267	0,333	0,200	0,333	0,333	0,333	0,200
7	Начальный диаметр валков	0,250	0,133	0,333	0,125	0,250	0,067	0,333	0,250
8	Глубина вреза валков	0,375	0,133	0,250	0,125	0,125	0,067	0,250	0,250
9	Валковая арматура	0,375	0,231	0,333	0,231	0,125	0,231	0,333	0,154
10	Ширина буртов	0,375	0,143	0,333	0,231	0,125	0,286	0,333	0,154
11	Усилие прокатки	0,333	0,267	0,400	0,231	0,333	0,333	0,400	0,154
12	Воздействие на валковую арматуру	0,286	0,267	0,400	0,231	0,143	0,333	0,400	0,154
13	Мощность прокатки	0,111	0,267	0,400	0,231	0,333	0,333	0,400	0,154
14	Расход воды	0,250	0,200	0,333	0,200	0,250	0,200	0,333	0,200

Расчет значения частного показателя эффективности для каждого критерия оптимальности типа калибров осуществляется по формуле (3.5). Например, значение частного показателя эффективности – стабильность формоизменения ($i = 1$) для калибра с кодом 1134 составит (см. таблицу 4.5):

$$g_1 = \prod_{j=C, D, L, P} r_{1jn} = 0,375 \cdot 0,231 \cdot 0,500 \cdot 0,231 = 0,010.$$

Остальные значения частных показателей эффективности для каждого калибра приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Значения частных показателей эффективности g_i

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1134														
g_i	0,010	0,003	0,003	0,013	0,002	0,002	0,001	0,002	0,007	0,008	0,005	0,004	0,002	0,003
3224														
g_i	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,004	0,001	0,001	0,004	0,003	0,004	0,007	0,005	0,003
3222														
g_i	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,001	0,001	0,004	0,003	0,004	0,007	0,005	0,003
1224														
g_i	0,005	0,004	0,003	0,006	0,002	0,002	0,001	0,002	0,007	0,004	0,008	0,007	0,003	0,003
2121														
g_i	0,001	0,000	0,000	0,003	0,000	0,007	0,001	0,001	0,001	0,002	0,007	0,003	0,007	0,003

Значение общего показателя эффективности рассчитывается по формуле (3.4). Например, для калибра 1134 составит:

$$G_k = \sum_{i=1}^{n_{CK}} a_i \cdot g_i = 0,3 \cdot 0,010 + 0,1 \cdot 0,003 + 0,1 \cdot 0,003 + 0,03 \cdot 0,013 + 0,1 \cdot 0,002 +$$

$$+ 0,05 \cdot 0,002 + 0,03 \cdot 0,001 + 0,1 \cdot 0,002 + 0,02 \cdot 0,007 + 0,04 \cdot 0,008 + 0,05 \cdot 0,005 +$$

$$+ 0,03 \cdot 0,004 + 0,05 \cdot 0,002 + 0 \cdot 0,003 = 0,0053,$$

где коэффициенты влияния каждого частного показателя эффективности a_i взяты по экспертным оценкам из таблицы 3.1.

Для остальных калибров значения общего показателя эффективности представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Значения общего показателя эффективности калибров G_k

Код калибра	1134	3224	3222	1224	2121
G_k	0,0053	0,0029	0,0029	0,0038	0,0018

Далее определяем значение коэффициента b_n , учитывающего отрицательный эффект роста общего количества калибров в схеме калибровки по формуле (3.3). Для этого коэффициент a_n примем равным 0,8, а минимально возможное количество калибров, применяемых при производстве швеллера 24У на рельсобалочном стане, определим по следующей формуле [19]:

$$\begin{aligned} n_{\text{кш}} &= 0,0333N + 0,208A_1 - 0,0008A_1^2 - 7,55 = \\ &= 0,0333 \cdot 24 + 0,208 \cdot 149,07 - 0,0008 \cdot 149,07^2 - 7,55 = 6,48 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Таким образом минимальное количество швеллерных калибров, использующихся при прокатке швеллера 24У равно 7. Также необходимо использовать как минимум два контрольных и один разрезной калибр, следовательно, общее минимальное количество калибров равно 10.

$$b_n = 1 - a_n \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\min}} = 1 - 0,8 \cdot \frac{12 - 10}{10} = 0,84.$$

Тогда значение целевой функции схемы калибровки составит:


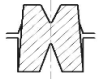
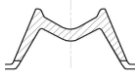
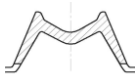
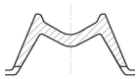
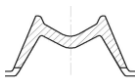
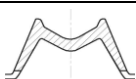
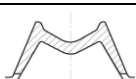
$$Q_{\text{заводская}}^{\text{ск}} = b_n \frac{\sum_{k=1}^{N_k} G_k}{N_k} = 0,84 \cdot \frac{0,00529 + 0,00291 \cdot 6 + 0,00287 \cdot 2 + 0,00380 \cdot 2 + 0,00183}{12} = 0,0027.$$

4.2.2.2 Расчет значения целевой функции режима обжатий заводской калибровки

В соответствии с методикой, изложенной в п. 3.9, для определения значений частных показателей эффективности необходимо произвести расчет энергосиловых параметров калибровки. Так как известны все размеры калибров (рисунок 4.4) и схема прокатки (таблица 4.2), то расчет формоизменения не производится. Характеристики формоизменения представлены в таблице 4.8.

Результаты расчета энергосиловых параметров приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Характеристики формоизменения заводской калибровки швеллера 24У

$N_{кл}$	N_k	N_{II}	N_k ш	$N_{кк}$	Схема калибра	Стенка		Действительные фланцы			Ложные фланцы		
						d , мм	$l_{ст}$, мм	b , мм	a , мм	$l_{ф}$, мм	$b_{л}$, мм	$a_{л}$, мм	$l_{л}$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
об ж	я н н щ й	13				$B_d = 325 \text{ мм}, B_6 = 375 \text{ мм}, H_{вр} = 57 \text{ мм}, s = 16 \text{ мм}$							
об ж	I	12	10			175	225	80	40	40	65	35	25
об ж	II	11	9			120	215	75	25	88	70	40	33
об ж	II	10	8			85	215	75	25	88	70	40	33
об ж	III	9	7			63	215	66	20	98	60	34	38
об ж	III	8	6			28	215	66	20	98	60	34	38
I	1	7	5			19	216,8	44,3	13,3	98	45	25	27
I	2	6	4			12	221,6	30,8	8,8	97	30	19	12,5

Продолжение таблицы 4.8

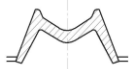
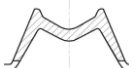
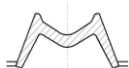
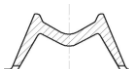
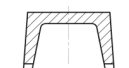
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I	3	5		2		8	224,6	19,9	10,2	86,5	27	15	6,5
II	4	4	3			7	227	16,3	8,3	88	25	12	5
II	5	3		1		6	229,2	14,5	8,4	84	23	10	4
II	6	2	2			5,5	232	13	7,3	85	19	–	2
III	7	1	1			5	239,4	12,3	7	87	20	–	0,3

Таблица 4.9 – Энергосиловые параметры прокатки швеллера 24У на стане 800 по заводскому режиму обжатий из стали СтЗкп при температуре нагрева 1260 °С

№	Клеть	$H_{1С}$, мм	$B_{1С}$, мм	D_k , мм	u , м/с	n , об/мин	$t_{\text{сер.полосы}}$	σ , МПа	P , МПа	F , мм ²
1	обжимная	210	260,0	795,0	4,77	90	1250	49,2	76,5	36152,5
2		175	215,0	829,8	5,41	90	1247,7	50,6	71,6	28524,2
3		154,9	215,0	850,1	5,02	90	1247,5	41,0	74,2	14651,6
4		132,8	215,0	872,2	6,74	90	1243	55,0	71,6	25157,4
5		118,8	215,0	886,8	5,60	90	1239	48,2	76,8	16919,6
6		83,8	215,0	921,2	10,01	90	1233	62,7	69,5	27298,0
7	I	53,8	216,8	796,2	21,2	155	1198	76,3	74,1	23618,4
8		32,1	221,6	817,9	28,5	155	1191	82,3	62,6	20628,7
9		20,8	224,6	829,2	34,7	155	1173	86,2	58,9	15263,7
10	II	17,4	227,0	832,6	29,7	155	1114	86,4	116,1	8565,4
11		15,0	229,2	835,0	29,6	155	1064	95,4	151,6	7194,8
12		13,1	232,0	836,9	30,4	155	1008	109,7	193,4	6446,0
13	III	12,0	239,4	838,0	28,7	170	934	125,8	329,7	4972,9

Продолжение таблицы 4.9

№	Клет ь	P , МН	ψ_{Π}	$M_{\text{вал}}$, кН·м	$M_{\text{пр}}$, кН·м	$N_{\text{пр}}$, кВт	W_i , кВт·ч/т	ΣW , кВт·ч/т	λ	L , м
1	обжимная	2,8	0,545	278,6	510,3	4809,5	0,84	19,29	1,14	5,6
2		2,0	0,547	268,1	364,0	3430,3	0,65		1,45	8,1
3		1,1	0,517	76,5	127,6	1202,9	0,33		1,13	9,2
4		1,8	0,555	233,9	318,5	3001,6	0,84		1,24	10,7
5		1,3	0,529	108,1	169,1	1593,9	0,54		1,12	12,0
6		1,9	0,593	285,2	374,2	3526,4	1,30		1,42	17,0
7	I	1,8	0,621	241,7	312,4	5070,9	1,78		1,55	26,3
8		1,3	0,643	159,3	211,6	3434,9	1,81		1,64	43,1
9		0,9	0,623	78,0	114,3	1855,4	1,58		1,52	65,5
10	II	1,0	0,562	43,0	83,1	1349,6	1,74		1,19	77,8
11		1,1	0,564	39,3	83,3	1352,0	2,06		1,15	89,3
12		1,3	0,576	40,6	90,7	1472,9	2,58		1,10	98,2
13	III	1,7	0,585	40,9	106,7	1899,1	3,24		1,08	106,2

Таким образом, получены все необходимые числовые величины для расчета выбранных частных показателей эффективности, приведенных в таблице 3.24. Все величины в таблице 4.10 выражены в соответствующих единицах физических величин и имеют различную размерность. Для расчета значения общего показателя эффективности, а в дальнейшем и значения целевой функции необходимо осуществить переход к безразмерным величинам, согласно п. 3.11 по формуле (3.11). С этой целью необходимо рассчитать и использовать допустимые или номинальные значения для каждого выбранного частного показателя эффективности.

Расчет допустимого усилия прокатки $[P]$ осуществляется по формуле [19]:

$$[P] = 0,1D_k^3 [\sigma] \frac{L+l}{(L+l-c)c}, \quad (4.9)$$

где $[\sigma]$ – допустимое напряжение на изгиб (для стальных кованных валков $[\sigma] = 120 \div 130$ МПа [19, с. 29], для чугунных валков $[\sigma] = 70 \div 80$ [150, с. 103]); L –

длина бочки валка; $l = (1,0 \div 1,1)d_{ш}$ – длина шейки валка; c – расстояние от середины шейки валка до середины рассматриваемого калибра.

В таблице 4.10 представлены значения параметров $[\sigma]$, L , l и c , а также полученные значения допустимого усилия прокатки для каждого прохода. Значения для $[\sigma]$ взяты средние по указанным выше интервалам для каждого материала.

Таблица 4.10 – Основные данные для расчета допустимого усилия прокатки $[P]$

№ прохода	Материал	$[\sigma]$, МПа	L , мм	l , мм	c , мм
1	2	3	4	5	6
1	Ст50	125	2300	608,03	2236,51
2	Ст50	125	2300	608,03	1856,51
3	Ст50	125	2300	608,03	1428,51
4	Ст50	125	2300	608,03	1428,51
5	Ст50	125	2300	608,03	1023,51
6	Ст50	125	2300	608,03	1023,51
7	60ХН	125	1900	514,25	560,93
7	60ХН	125	1900	514,25	1049,13
8	60ХН	125	1900	514,25	1525,23
9	СПХН-45	86	1900	514,25	620,03
10	СПХН-45	86	1900	514,25	1231,13
11	СПХН-45	86	1900	514,25	1792,73
12	СПХН-49	86	1200	514,25	636,83

Результаты расчета допустимого усилия прокатки $[P]$ и других показателей эффективности f_j для каждого прохода приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Основные данные для расчета частных показателей эффективности режима обжарки

№ пр	$[P]_i$, МН	N_{H_j} , кВт	M_{H_j} , кН·м	ППр, т/год	W_B , кВт·ч/т	K_P	K_M	K_{Π}	K_W	K_T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ящичный	12,2	6400	679,06	–	–	0,228	0,751	–	–	–
1	10,5	6400	679,06	–	–	0,192	0,378	–	–	–
2	9,9	6400	679,06	–	–	0,106	0,168	–	–	–
3	11,4	6400	679,06	–	–	0,158	0,302	–	–	–
4	13,1	6400	679,06	–	–	0,099	0,189	–	–	–
5	14,7	6400	679,06	–	–	0,129	0,340	–	–	–
6	14,7	8000	492,87	–	–	0,119	0,468	–	–	–
7	11,5	8000	492,87	–	–	0,112	0,547	–	–	–
8	12,7	8000	492,87	–	–	0,071	0,319	–	–	–
9	10,8	8000	492,87	–	–	0,092	0,187	–	–	–
10	8,3	8000	492,87	–	–	0,131	0,181	–	–	–
11	10,9	8000	492,87	–	–	0,114	0,200	–	–	–
12	12,6	3200	179,75	–	–	0,130	0,544	–	–	–
Весь процесс:	–	–	–	128235 8,4	19,29	–	–	1,000	1,000	0,720

Расчет значений частных показателей эффективности осуществляется по формулам (3.11–3.13). Полученные значения представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Значения частных показателей эффективности f_j

f_P	f_M	f_T	f_{Π}	f_W
0,097	0,355	0,720	1,000	1,000

При равной влиятельности частных показателей эффективности на значение целевой функции Q_{po} (3.10), $e_j = \frac{1}{5} = 0,2$, получим:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{заводской}}^{po} &= \sum_{i=1}^k e_i \cdot f_j = e_i \cdot f_P + e_i \cdot f_M - e_i \cdot f_T - e_i \cdot f_{\Pi} + e_i \cdot f_W = \\
 &= 0,2 \cdot 0,097 + 0,2 \cdot 0,355 - 0,2 \cdot 0,720 - 0,2 \cdot 1,000 + 0,2 \cdot 1,000 = -0,0534
 \end{aligned}$$

Таким образом, заводская калибровка швеллера 24У характеризуется значениями целевых функций:

- критерия оптимальности схемы калибровки $Q_{\text{заводская}}^{\text{СК}} = 0,0027$,
- критерия оптимальности режима обжатий $Q_{\text{заводской}}^{\text{РО}} = -0,0534$.

4.2.3 Расчет рациональной калибровки для прокатки швеллера 24У

Проведенный анализ действующей калибровки для прокатки швеллера 24У в условиях РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК» позволил выявить ряд возможностей для ее совершенствования.

В действующей калибровке применена типовая схема прямополочной калибровки с увеличенными уклонами боковых стенок калибра и с прогибом шейки (стенки) профиля (ТСК 1). Известной особенностью такой схемы калибровки является большая глубина вреза ручьев в калибры, что, как следствие, приводит к проявлению довольно большого списка недостатков, основными, наиболее существенными из которых являются следующие:

- необходимость использования заготовок валков с увеличенным начальным диаметром, что резко увеличивает их стоимость;
- большие затраты станочного времени на изготовление валков;
- неэффективное использование наиболее износостойкого поверхностного слоя новых валков;
- повышенный износ боковых стенок калибров, связанный с большими перепадами диаметров валков и по ручьям и по калибру и возникновением значительного скольжения металла по поверхности валков;
- повышенные значения крутящего момента прокатки, и как следствие – значительные энергозатраты на прокатку;
- при использовании такой калибровки в клетях трио неизбежным является применение очень высоких переходных конусов на буртах, что снижает прочность буртов и резко увеличивает риск их поломок как при

эксплуатации, так и при транспортировании и перевалке. Для снижения такого риска приходится использовать бурты с большой шириной, что снижает эффективность использования бочки валка для размещения калибров. Есть и другие, менее значимые недостатки.

В то же время, несомненным достоинством этого типа калибровки является относительно малая ширина калибров по врезу в валки, что позволило разместить на валках обжимной и черновой клетей по одному дублирующему калибру (приложение Г.1 и Г.2). Но в связи с меньшей длиной раската и большей его температурой в первых клетях, износ калибров этих клетей меньше чем износ калибров предчистовой клетки, где разместить дублирующие калибры не удалось, зато здесь получены бурты большой ширины.

Анализ энергосиловых характеристик режима обжатий, приведенный в таблицах 4.9–4.11 показал, что загрузка рабочих клетей по силе прокатки довольно мала (не более 0,309 от допустимой, в среднем 0,140), что связано с малой шириной калибров, а загрузка по крутящему моменту и мощности прокатки существенно выше (до 0,708, в среднем 0,372), что как раз и является следствием большой глубины калибров и значительного скольжения металла по валкам в них. Примененное в калибровке распределение обжатий по проходам привело к весьма неравномерной их энергосиловой загрузке (см. таблицы 4.10 и 4.12), не имеющей видимых оснований.

С учетом указанных недостатков действующей калибровки и возможностей стана, поставлена цель произвести разработку новой, более совершенной калибровки, устраняющей или уменьшающей эти недостатки. Для достижения этой цели используем выявленные во второй главе возможности оптимизации калибровки:

- 1) использовать другую схему калибровки, обладающую более высокими характеристиками по критерию оптимальности схемы калибровки, по выбранным в п. 3.1 показателям эффективности и значению целевой функции, формула (3.2);

2) разработать для этой схемы калибровки оптимальный режим обжатий, используя выбранные в п. 3.8 показатели эффективности и сформированный критерий оптимальности режима обжатий, формула (3.9).

4.2.3.1 Поиск рациональной схемы калибровки

Сопоставительный анализ применимости возможных схем калибровки (см. п. 3.4.3.1) для использования на РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК» показал, что наиболее рациональным вариантом является использование схемы развернутой калибровки с применением контрольных калибров нового типа – с двойным уклоном действительных фланцев [127].

Количество швеллерных калибров в развернутой калибровке примем равным 8. При этом, для использования имеющегося в цехе опыта правки и отделки готового профиля, сохраним форму и размеры чистового калибра.

Схема развернутой швеллерной калибровки, а также коды калибров, входящих в нее представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Основные параметры новой схемы калибровки

№ калибра (против хода прокатки)	Схема калибра	Код калибра	Наименование блока калибров	Номер прохода (против хода прокатки)
1	2	3	4	5
1		1134	Чистовой	1
2		3512	Формообразующий	2
3		3514		3
4		3314		4
5		3313		5
6		3314		6
7		3313		7
8		2214	Разрезной	8

Продолжение таблицы 4.13

1	2	3	4	5
9		–	Ящичные калибры	9
				10
10		–		11
				12

Расчет значения целевой функции первого критерия оптимальности осуществляется согласно п. 3.5 и п. 4.2.2.1.

Из таблицы 4.13 видно, что в схеме калибровки присутствуют по одному калибру с кодами 1134, 3512, 3514 и 2214, по два калибра с кодами 3314 и 3313. Определим значения частного и общего показателей эффективности для этих восьми типов калибров. При этом используем те же показатели эффективности и методику расчета значения целевой функции 1-го критерия оптимальности, которые применены выше для действующей заводской калибровки.

В таблицах 4.14–4.15 представлены нормированные ранговые значения для всех выбранных в п. 3.1 показателей эффективности по уровням варьирования характеристики в соответствии с кодами калибров из таблицы 4.14.

Таблица 4.14 – Нормированные ранги калибров r_{ijn} по уровням варьирования характеристик С, Д, Л, Р для калибров с кодами – 1134, 3512, 3514

i	Показатель эффективности	1134				3512				3514			
		С1	Д1	Л3	Р4	С3	Д5	Л1	Р2	С3	Д5	Л1	Р4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Стабильность формоизменения	0,375	0,231	0,500	0,231	0,250	0,154	0,250	0,231	0,250	0,154	0,250	0,231
2	Образование дефектов	0,375	0,067	0,500	0,231	0,250	0,267	0,167	0,231	0,250	0,267	0,167	0,231
3	Износ	0,375	0,067	0,500	0,231	0,250	0,267	0,250	0,231	0,250	0,267	0,250	0,231
4	Сложность настройки	0,333	0,231	0,500	0,333	0,167	0,154	0,250	0,200	0,167	0,154	0,250	0,333

Продолжение таблицы 4.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5	Переточка валков	0,286	0,067	0,500	0,231	0,286	0,267	0,250	0,231	0,286	0,267	0,250	0,231
6	Использование бочки валков	0,111	0,333	0,333	0,200	0,222	0,200	0,333	0,200	0,222	0,200	0,333	0,200
7	Начальный диаметр валков	0,250	0,067	0,333	0,125	0,250	0,267	0,333	0,125	0,250	0,267	0,333	0,125
8	Глубина вреза валков	0,375	0,067	0,500	0,125	0,250	0,267	0,250	0,125	0,250	0,267	0,250	0,125
9	Валковая арматура	0,375	0,231	0,333	0,231	0,250	0,154	0,333	0,231	0,250	0,154	0,333	0,231
10	Ширина буртов	0,375	0,286	0,333	0,231	0,250	0,214	0,333	0,231	0,250	0,214	0,333	0,231
11	Усилие прокатки	0,333	0,333	0,200	0,231	0,167	0,200	0,400	0,231	0,167	0,200	0,400	0,231
12	Воздействие на валковую арматуру	0,286	0,333	0,200	0,231	0,286	0,200	0,400	0,231	0,286	0,200	0,400	0,231
13	Мощность прокатки	0,111	0,333	0,200	0,231	0,222	0,200	0,400	0,231	0,222	0,200	0,400	0,231
14	Расход воды	0,250	0,200	0,333	0,200	0,250	0,200	0,333	0,200	0,250	0,200	0,333	0,200

Таблица 4.15 – Нормированные ранги калибров r_{ijn} по уровням варьирования характеристик С, Д, Л, Р для калибров с кодами – 3314, 3313, 2214

i	Показатель эффективности	3314				3313				2214			
		С3	Д3	Л1	Р4	С3	Д3	Л1	Р3	С2	Д2	Л1	Р4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Стабильность формоизменения	0,250	0,250	0,250	0,231	0,250	0,250	0,250	0,231	0,125	0,231	0,250	0,231
2	Образование дефектов	0,250	0,250	0,167	0,231	0,250	0,250	0,333	0,231	0,125	0,133	0,167	0,231

Продолжение таблицы 4.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	Износ	0,250	0,250	0,250	0,231	0,250	0,250	0,250	0,231	0,125	0,133	0,250	0,231
4	Сложность настройки	0,167	0,167	0,250	0,333	0,167	0,167	0,250	0,333	0,333	0,231	0,250	0,333
5	Переточка валков	0,286	0,286	0,250	0,231	0,286	0,286	0,250	0,231	0,143	0,133	0,250	0,231
6	Использование бочки валков	0,222	0,222	0,333	0,200	0,222	0,222	0,333	0,200	0,333	0,267	0,333	0,200
7	Начальный диаметр валков	0,250	0,250	0,333	0,125	0,250	0,250	0,333	0,125	0,250	0,133	0,333	0,125
8	Глубина вреза валков	0,250	0,250	0,250	0,125	0,250	0,250	0,250	0,125	0,125	0,133	0,250	0,125
9	Валковая арматура	0,250	0,250	0,333	0,231	0,250	0,250	0,333	0,231	0,125	0,231	0,333	0,231
10	Ширина буртов	0,250	0,250	0,333	0,231	0,250	0,250	0,333	0,231	0,125	0,143	0,333	0,231
11	Усилие прокатки	0,167	0,167	0,400	0,231	0,167	0,167	0,400	0,231	0,333	0,267	0,400	0,231
12	Воздействие на валковую арматуру	0,286	0,286	0,400	0,231	0,286	0,286	0,400	0,231	0,143	0,267	0,400	0,231
13	Мощность прокатки	0,222	0,222	0,400	0,231	0,222	0,222	0,400	0,231	0,333	0,267	0,400	0,231
14	Расход воды	0,250	0,250	0,333	0,200	0,250	0,250	0,333	0,200	0,250	0,200	0,333	0,200

Значения i -х частных показателей эффективности (формула (3.5)) для каждого калибра приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Частные значения показателей эффективности g_i

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1134														
g_i	0,010	0,003	0,003	0,013	0,002	0,002	0,001	0,002	0,007	0,008	0,005	0,004	0,002	0,003
3512														
g_i	0,002	0,003	0,004	0,001	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,004	0,003	0,005	0,004	0,003
3514														
g_i	0,002	0,003	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,004	0,003	0,005	0,004	0,003
3314														
g_i	0,004	0,002	0,004	0,002	0,005	0,003	0,003	0,002	0,005	0,005	0,003	0,008	0,005	0,004
3313														
g_i	0,004	0,005	0,004	0,002	0,005	0,003	0,003	0,002	0,005	0,005	0,003	0,008	0,005	0,004
2214														
g_i	0,002	0,000	0,001	0,006	0,001	0,006	0,001	0,001	0,002	0,001	0,008	0,004	0,008	0,003

Значения общего показателя эффективности (формула (3.4)) приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Значения общего показателя эффективности калибров G_k

Код калибра	1134	3512	3514	3314	3313	2214
G_k	0,00543	0,00297	0,00300	0,00354	0,00378	0,00238

Так как количество калибров в схеме калибровки изменилось, то коэффициент b_n , учитывающий отрицательный эффект увеличения общего количества калибров в схеме калибровки будет равен $b_n = 1,16$.

Значение целевой функции (формула (3.2)):

$$Q_{\text{новая}}^{\text{СК}} = b_n \frac{\sum_{k=1}^{N_k} G_k}{N_k} = 1,16 \cdot \frac{0,00543 + 0,00297 + 0,00300 + 0,00238 + 0,00354 \cdot 2 + 0,00378 \cdot 2}{8} = 0,0041.$$

Значение целевой функции новой развернутой схемы калибровки ($Q_{\text{новая}}^{\text{СК}} = 0,0041$) больше значения целевой функции заводской схемы калибровки ($Q_{\text{заводская}}^{\text{СК}} = 0,0027$) в $\frac{Q_{\text{новая}}^{\text{СК}}}{Q_{\text{заводская}}^{\text{СК}}} = \frac{0,0041}{0,0027} = 1,5$ раз. Следовательно, по выбранным, наиболее общим и значимым показателям эффективности, новая схема калибровки лучше удовлетворяет требованию оптимальности для прокатки швеллера 24У на стане 800 РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

4.2.3.2 Оптимизация режима обжатий для новой схемы калибровки

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


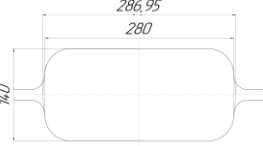
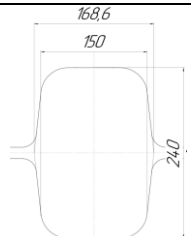
С учетом связи коэффициентов обжатия в отдельных проходах $\frac{1}{\eta_i}$ с общим коэффициентом обжатия $\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$ для всей калибровки $\prod_{i=1}^N \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \text{const}$, мы имеем задачу со взаимосвязанными параметрами.

Для расчета показателей эффективности режима обжатий и целевой функции 2-го критерия оптимальности, для каждого, используемого при поиске оптимума распределения коэффициентов обжатия $\frac{1}{\eta_i}$ по проходам, необходимо осуществлять расчет размеров всех калибров калибровки и соответствующих деформационных и энергосиловых параметров прокатки. С этой целью

сформирована математическая модель в программе Microsoft Excel, позволяющая осуществлять одновременный расчет размеров калибров и энергосиловых параметров, основанная на конструктивной модели описанной в п. 4.1. Модель позволяет рассчитывать значения частных и общих показателей эффективности, а также значение целевой функции режима обжатий. Распределение коэффициентов обжатия по стенке профиля швеллера $\frac{1}{\eta_i}$ по проходам, обеспечивающие наименьшее значение целевой функции критерия оптимальности режима обжатий и будет считаться оптимальным.

Заготовку примем такую же, как и в заводской калибровке швеллера 24У: сечением 250×250 мм и длиной 4900 мм. Промежуточная заготовка для разрезного калибра получена за четыре ящичных прохода. Результаты ее расчета представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Схема прокатки швеллера 24У в ящичных калибрах в обжимной клетки 950

Калибр	№ прохода	Сечение		ΔН	ΔВ
		Н	В		
250 		250	250		
↙ 270°					
	1	195	265	55	15
	2	140	280	55	15
↙ 90°					
	3	260	145	20	5
	4	240	150	20	5
↙ 90					

Размеры промежуточной прямоугольной заготовки для разрезного калибра: 150×240 мм, следовательно, суммарный коэффициент обжатия $\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$ в швеллерных калибрах по формуле (4.2) равен 30.

Согласно п. 3.12, в качестве начальной точки поиска оптимального режима обжатий, выступает n -мерная "средняя" точка, с координатами, равными средним значениям коэффициентов обжатия по стенке профиля швеллера, формулы (3.12)–(3.13). Однако, практика проведения оптимизирующих расчетов показала, что для уменьшения количества итераций при нахождении минимума, в качестве исходной точки лучше использовать «расчетную точку», координаты которой определяются по рекомендациям [19]:

$$\varepsilon = \frac{\ln \frac{1}{\eta}}{\ln \frac{1}{\eta_{\Sigma}}} = 0,08N_{\text{кш}} - 0,006N_{\text{кш}}^2 - 0,0304n_{\text{кш}} + 4,64 \frac{N_{\text{кш}}}{N \cdot A_1} + 0,169, \quad (4.10)$$

$$\frac{1}{\eta_i} = \left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}} \right)^{\varepsilon}. \quad (4.11)$$

«Расчетные» коэффициенты обжатия по стенке швеллера $\frac{1}{\eta_i}$ представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – «Расчетные» значения коэффициентов обжатия по стенке швеллера ("нулевая точка" поиска минимума)

№ прохода	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{1}{\eta_i}$	1,349	1,913	1,761	1,793	1,466	1,696	1,088	1,360
							$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	30,0

Расчет размеров калибров осуществлялся согласно п. 4.1.

Определим значение целевой функции «расчетного» режима обжатий.

Расчет значений частных показателей эффективности осуществляется по формулам (3.11–3.13). Полученные значения представлены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Значения частных показателей эффективности f_k

f_P	f_M	f_T	f_{Π}	f_W
0,102	0,459	0,765	1,627	0,519

При равной влиятельности частных показателей эффективности на значение целевой функции $Q_{\text{расчетной}}^{\text{po}}$ (3.10), $e_i = \frac{1}{5} = 0,2$, получим:

$$Q_{\text{расчетной}}^{\text{po}} = \sum_{i=1}^k e_i \cdot f_k = e_i \cdot f_P + e_i \cdot f_M + e_i \cdot f_T + e_i \cdot f_{\Pi} + e_i \cdot f_W = \\ = 0,2 \cdot 0,102 + 0,2 \cdot 0,459 - 0,2 \cdot 0,765 - 0,2 \cdot 1,627 + 0,2 \cdot 0,519 = -0,2624$$

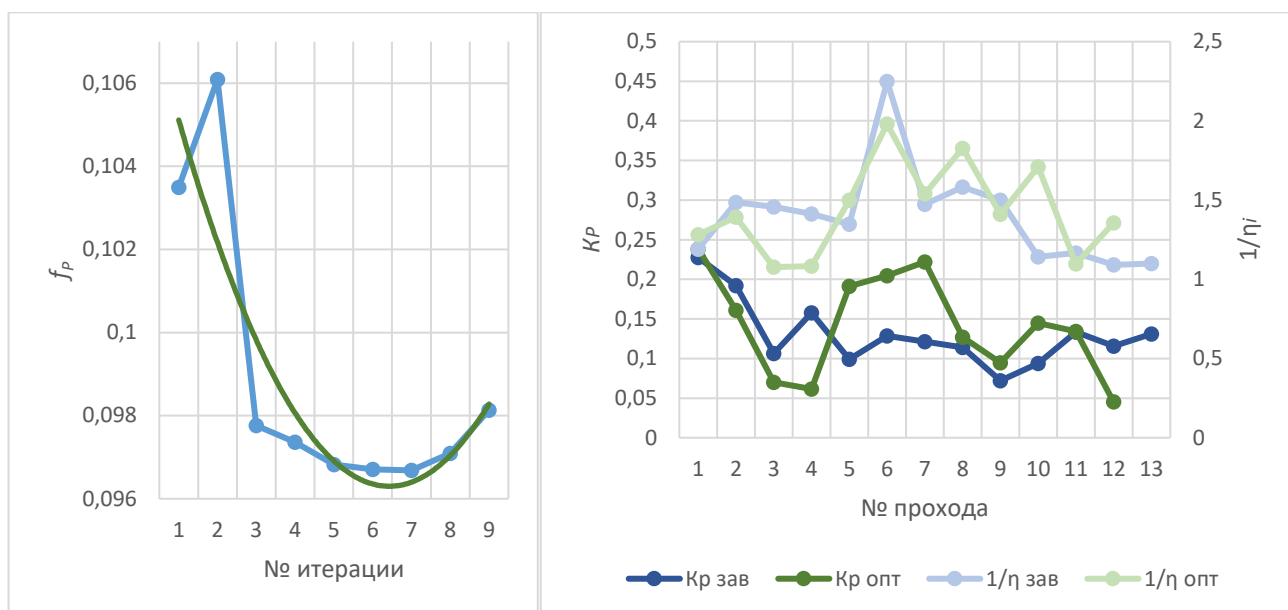
Значение целевой функции $Q_{\text{расчетной}}^{\text{po}} = -0,2624$ для «расчетного» режима обжатий, даже без проведения его оптимизации уже меньше значения целевой функции заводского режима обжатий $Q_{\text{заводской}}^{\text{po}} = -0,0534$ в $\frac{Q_{\text{расчетной}}^{\text{po}}}{Q_{\text{заводской}}^{\text{po}}} = \frac{-0,2624}{-0,0534} = 4,9$ раз. Следовательно, даже «расчетный» режим обжатий лучше для производства швеллера 24У.

Выясним, какое влияние оказывает изменение режима обжатий на каждый выбранный в п. 3.8 частный показатель эффективности f_j . С этой целью проведена оптимизация режима обжатий по каждому из этих частных показателей эффективности f_j .

– Усилие прокатки

Ход поиска оптимума по частному показателю эффективности f_P представлен на рисунке 4.5, а, из которого видно, что оптимум был найден при 6 итерации ($f_P \rightarrow \min$). Оптимальное значение частного показателя эффективности усилия прокатки f_P составляет 0,096, что лучше и «расчетного» значения – 0,102 и заводского – 0,097.

На рисунке 4.5, б приведено распределение безразмерного параметра K_P по проходам для оптимального и заводского режимов обжатий. На этом же графике представлено распределение коэффициентов обжатия по проходам. Видно, что в среднем, при более равномерном заводском режиме обжатий и загрузка рабочих клеток по усилию прокатки наблюдается более равномерная. Однако исходя из полученных максимальных значений силы прокатки и коэффициента загрузки по силе, заводской режим обжатий все же уступает оптимальному.



а

б

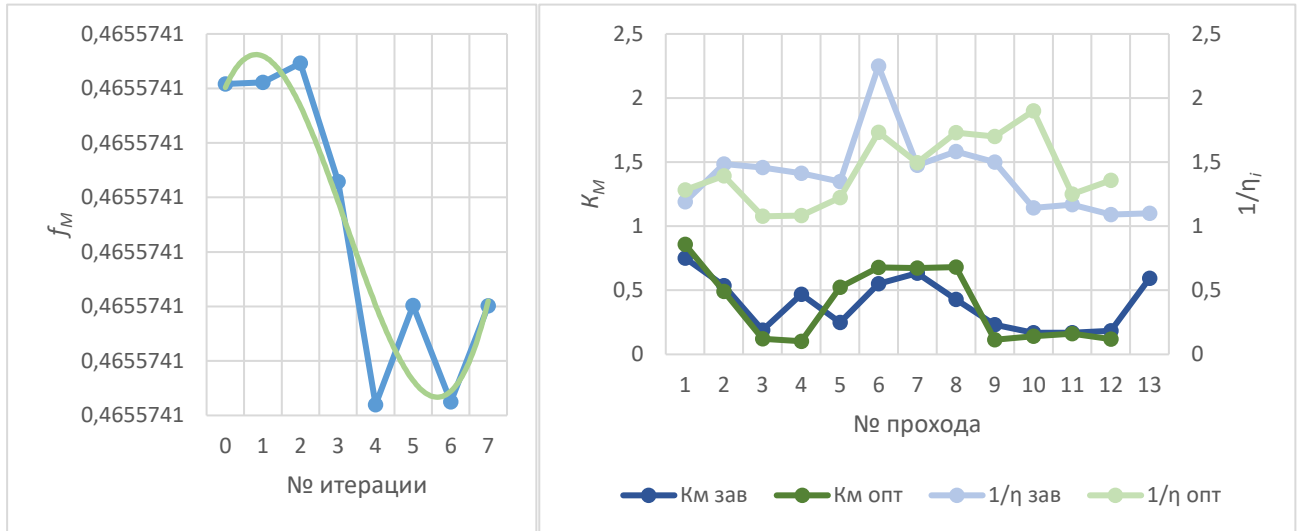
Рисунок 4.5 – График распределения частного показателя эффективности f_p (усилие прокатки) в зависимости от номера итерации (а) и график распределения безразмерного параметра K_p и коэффициентов обжатия по проходам $\frac{1}{\eta_i}$ для заводского и оптимизированного режимов обжатий (б)

– Момент прокатки

Из рисунка 4.6, а видно, что оптимум для частного показателя эффективности по моменту прокатки f_M был найден во время 6 итерации ($f_M \rightarrow \min$). Во время 4 итерации получено близкое, но несколько худшее значение частного показателя эффективности f_M . Оптимальное значение частного показателя эффективности момента прокатки f_M составляет 0,465574, «расчетное» значение – 0,465576 и заводское – 0,355. При оптимальном режиме обжатий значение f_M получилось лишь на немного лучше «расчетного», но хуже заводского.

На рисунке 4.6, б изображен график из которого видно, что в обоих случаях загрузка рабочих клеток по моменту прокатки относительно равномерна. Однако, в режиме обжатий оптимизированному по f_M величина абсолютного отклонения по моменту прокатки в разрезном калибре обжимной клетки (5 калибр) и во II клетки стана 800 (6–8 проходы) больше, чем в заводском. Это объясняется значительно большей шириной прокатываемых полос при использовании предлагаемой

развернутой калибровки по сравнению с прямополочной заводской, однако, учитывая общий низкий уровень загрузки стана и по силе прокатки, и по моменту прокатки, полученное увеличение этих показателей не является критичным.



а

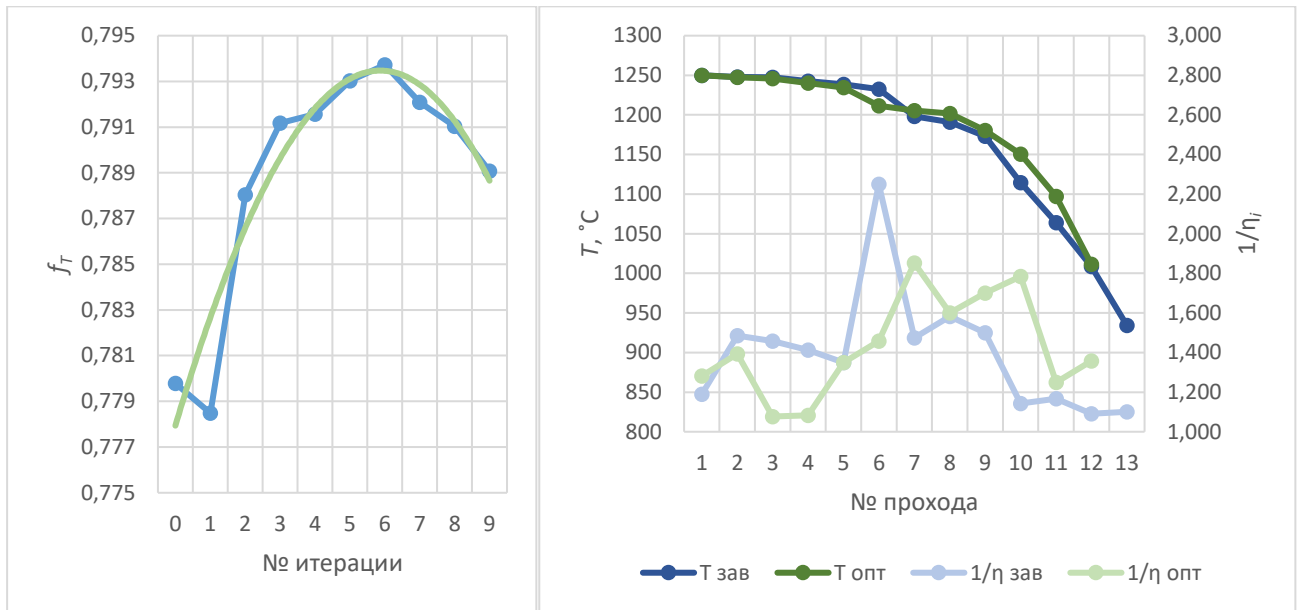
б

Рисунок 4.6 – График распределения частного показателя эффективности f_M (момент прокатки) в зависимости от номера итерации (а) и график распределения безразмерного параметра K_M и коэффициентов обжатия по проходам $\frac{1}{\eta_i}$ для заводского и оптимизированного режимов обжатий (б)

– Температура конца прокатки

При 6 итерации (рисунок 4.7, а) определено оптимальное значение частного показателя эффективности f_T – температуры конца прокатки ($f_T \rightarrow \max$). Оптимальное значение частного показателя эффективности f_T составляет 0,794, что лучше «расчетного» значения – 0,780 и заводского – 0,720.

Значение температуры конца прокатки для оптимального режима обжатий – 992 °С, «расчетного» – 974 °С и для заводского – 915 °С. Оптимальный по температуре режим обжатий и полученное при этом распределение температуры прокатки по проходам T_i представлены на рисунке 4.7, б.



а

б

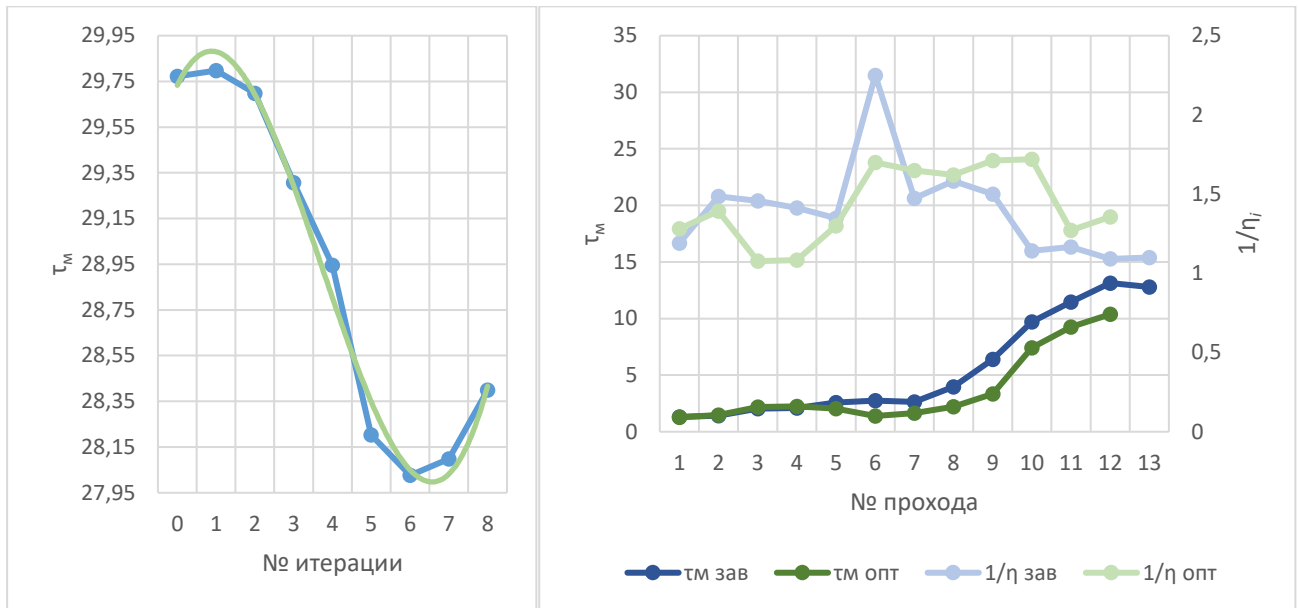
Рисунок 4.7 – График распределения частного показателя эффективности f_T (температура конца прокатки) в зависимости от номера итерации (а) и график распределения температуры конца прокатки T_i и коэффициентов обжатия по проходам $\frac{1}{\eta_i}$ для заводского и оптимизированного режимов обжатий (б)

– Производительность

"Узким местом", сдерживающим производительность стана является такт прокатки во II клетки трио линии 800. Поэтому сокращение машинного времени прокатки τ_M в этой клетке позволит получить оптимальное значение производительности ($\tau_M \rightarrow \min, \Pi \rightarrow \max$).

Как видно из рисунка 4.8, оптимальное значение времени определено во время 6 итерации. Оптимальное значение машинного времени прокатки τ_M составило 18,8 с, «расчетное» – 29,8 с и заводское – 42,3 с.

Производительность в таком случае составляет: для оптимального – 2216176,6 т/год; для «расчетного» – 2086224,2 т/год и для заводского режима обжатий – 1282358,4 т/год.



а

б

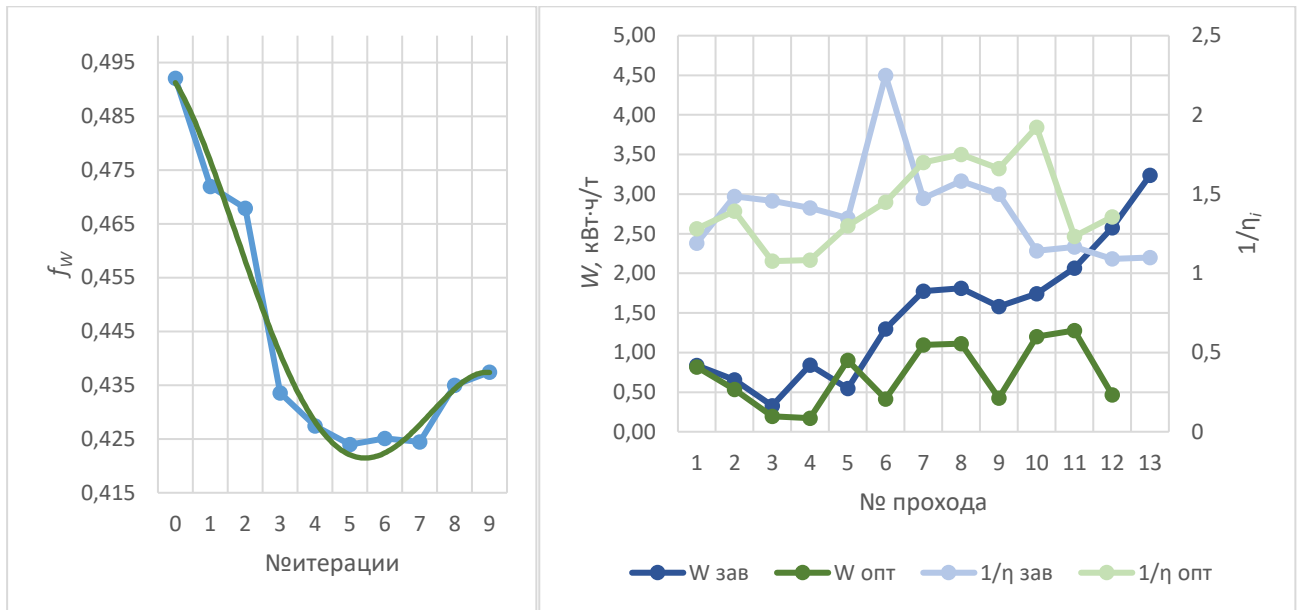
Рисунок 4.8 – График распределения машинного времени прокатки τ_M в зависимости от номера итерации (а) и график распределения машинного времени прокатки τ_M и коэффициентов обжатия по проходам $\frac{1}{\eta_i}$ для заводского и оптимизированного режимов обжатий (б)

– Энергозатраты на прокатку

Оптимальное значение частного показателя эффективности по энергозатратам на прокатку f_W определено при 5 итерации, что видно из рисунка 4.9, а ($f_W \rightarrow \min$). Показатель эффективности f_W для оптимизированного режима обжатий составил – 0,381, для «расчетного» – 0,465 и для заводского – 1,000.

Суммарные затраты энергии на 1 тонну проката составят: для оптимизированного режима обжатий – 8,62 кВт·ч/т, для «расчетного» – 10,00 кВт·ч/т и для заводского – 19,29 кВт·ч/т. Исходя из этого, видно значительное преимущество новой развернутой калибровки над прямополочной заводской калибровкой.

Затраты энергии на каждом отдельном проходе представлены на рисунке 4.9, б.



а

б

Рисунок 4.9 – График распределения частного показателя эффективности f_w (энергозатраты на прокатку) в зависимости от номера итерации (а) и график распределения энергозатрат W_i на прокатку одной тонны металла и коэффициентов обжатия по проходам $\frac{1}{\eta_i}$ для заводского и оптимизированного режимов обжатий (б)

На рисунке 4.10 приведено распределение всех оптимальных режимов обжатий для каждого частного показателя эффективности f_j . Установлено, что коэффициенты обжатия $\frac{1}{\eta_i}$ в 5 проходе находятся в диапазоне от 1,222 до 1,5, в 6–10 проходах в диапазоне от 1,450 до 1,980, в 11 проходе от 1,097 до 1,271 и в 12 проходе оптимальным оказался коэффициент обжатия равный 1,350 для всех показателей эффективности.

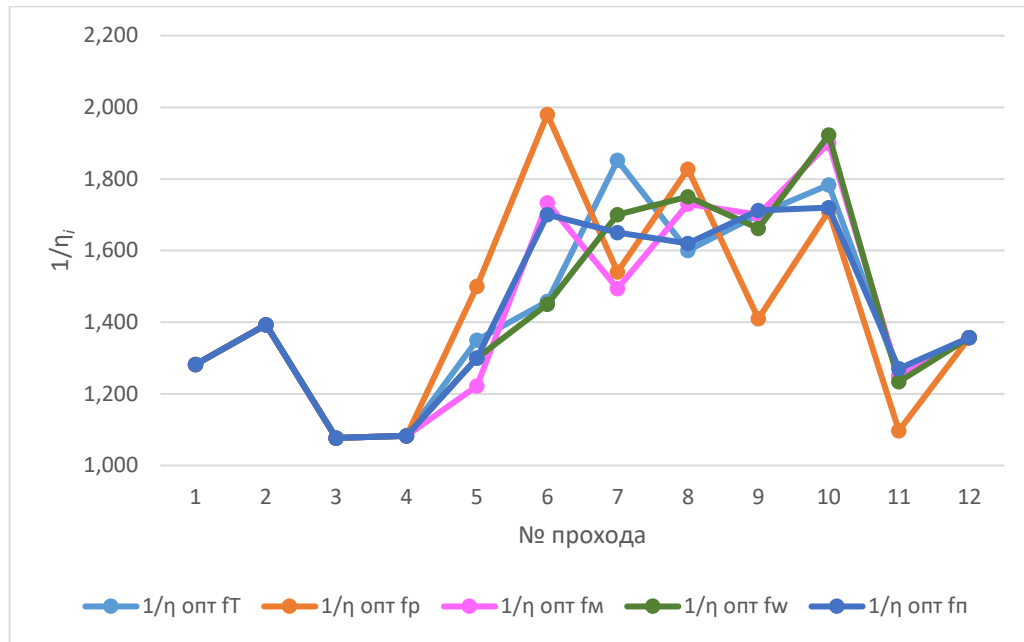


Рисунок 4.10 – Распределение коэффициентов обжатия по стене профиля швеллера $\frac{1}{\eta_i}$ по проходам для каждого оптимального режима обжатий по частным показателям эффективности f_j

Таким образом установлено, что изменение режимов обжатий по-разному влияет на каждый из выбранных нами показателей эффективности f_j , причем, отличия в оптимальных режимах обжатия по каждому из частных показателей весьма существенны и достигая оптимум по одному из показателей, мы "проваливаем" другой. Полученный результат можно использовать, когда какой-то из рассмотренных показателей эффективности f_j будет выступать в роли "единственной" цели оптимизации, а остальными можно пренебречь.

Однако, для практики более характерным является другой подход – один из показателей выбирается в качестве "главной цели" оптимизации, а оставшиеся показатели используются или в качестве ограничений, или в качестве второстепенных, менее значимых целей, но пренебречь определенным уровнем достижимости которых нельзя. В различных технико-экономических условиях, в качестве такой "главной цели" может выступать каждый из выделенных выше показателей, поэтому рассмотрены 5 оптимальных режимов обжатий, в каждом из которых на значение целевой функции Q_{po} (3.10) превалирует влияние

одного из показателей эффективности f_j и оптимальный режим обжати, в котором влияние каждого показателя эффективности одинакова. Для этого при формировании целевой функции Q_{po} (3.10) примем для показателя эффективности f_j , соответствующего "главной цели" оптимизации коэффициент влияния $e_i=0,6$, а для остальных, менее значимых, $e_i=0,1$ (варианты режимов обжати I-V). А для случая отсутствия приоритета в выборе главной цели, примем для всех показателей равную степень влияния $e_i=0,2$ (вариант режима обжати VI). Полученные таким образом распределения коэффициентов влияния e_i для каждого частного показателя эффективности f_j и номера варианта оптимальности режима обжати представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Варианты оптимальности режима обжати и соответствующее распределение коэффициентов влияния e_j

№ варианта	e_p	e_m	e_T	e_{II}	e_w
I	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1
II	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1
III	0,1	0,1	0,6	0,1	0,1
IV	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1
V	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6
VI	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

На рисунке 4.11 представлены графики поиска оптимальных режимов обжати для каждого варианта распределения e_j , указанных в таблице 4.21.

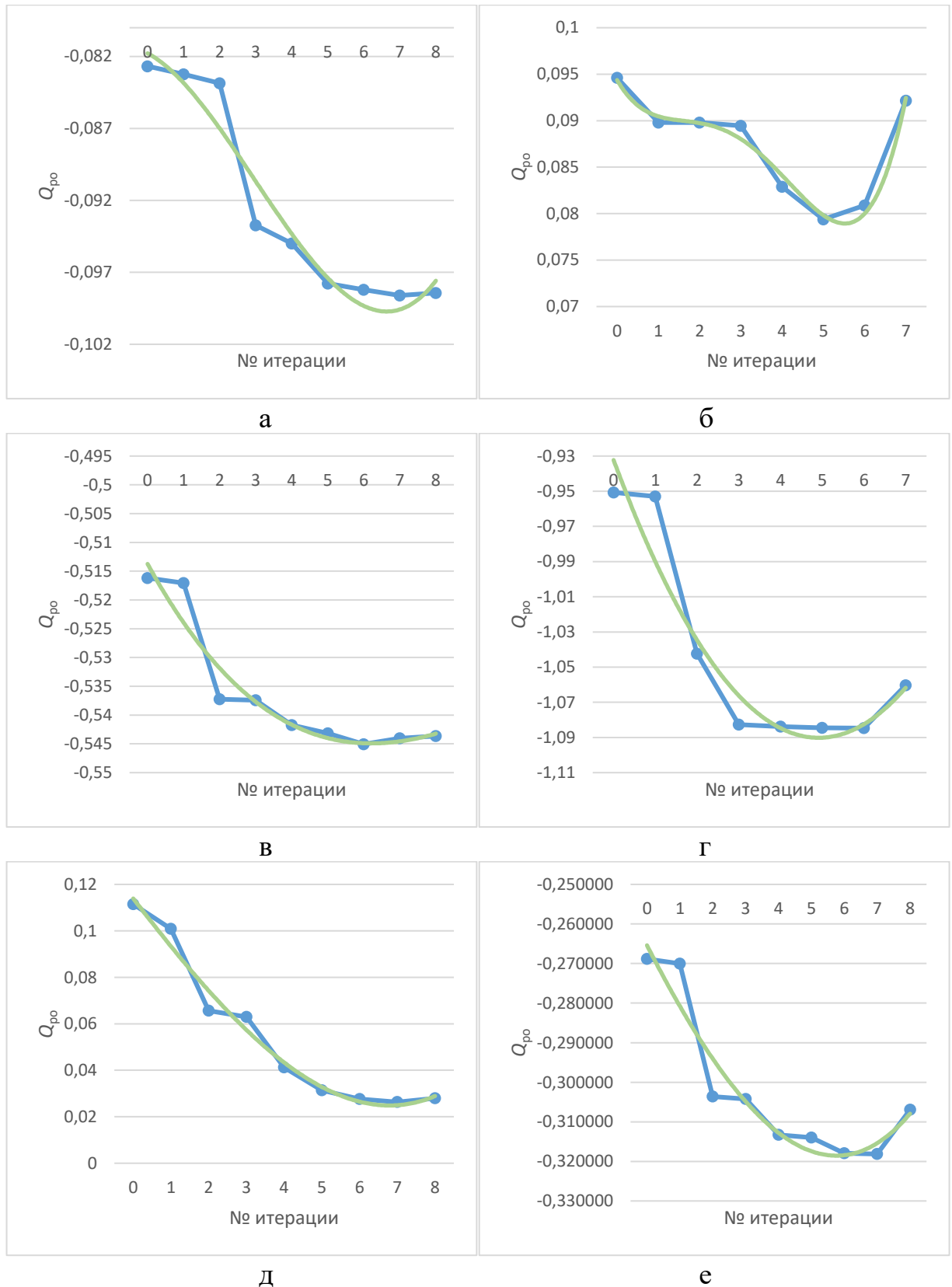


Рисунок 4.11 – Распределения значения целевой функции Q_{poi} по итерациям: а – I вариант, $e_p = 0,6$; б – II вариант, $e_M = 0,6$; в – III вариант, $e_T = 0,6$; г – IV вариант, $e_{II} = 0,6$; д – V вариант, $e_W = 0,6$; е – VI вариант, $e_j = 0,2$ (варианты оптимальности показаны в таблице 4.22).

В таблице 4.22 представлены значения частных показателей эффективности f_j и целевой функции $Q_{\text{новой}}^{\text{po}}$ для каждого варианта оптимизации режима обжарки новой калибровки (для выбранных коэффициентов влияния из таблицы 4.22). Кроме того, для заводской прямополочной калибровки и принятого в ней распределения обжарки по проходам, и для тех же вариантов оптимальности I–VI, проведен отдельный расчет значений целевой функции $Q_{\text{заводской}}^{\text{po}}$, результаты которого так же приведены в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Значение частных показателей эффективности f_j для оптимального режима обжарки по каждому варианту оптимизации и для заводского режима обжарки

№ варианта	f_P	f_M	f_T	f_{Π}	f_W	$Q_{\text{новой}}^{\text{po}}$	$Q_{\text{заводской}}^{\text{po}}$
I ($e_P=0,6$)	0,091	0,454	0,764	1,630	0,569	-0,0825	0,0220
II ($e_M=0,6$)	0,094	0,450	0,767	1,683	0,571	0,0916	0,1508
III ($e_T=0,6$)	0,109	0,473	0,779	1,733	0,478	-0,5347	-0,3865
IV ($e_{\Pi}=0,6$)	0,096	0,465	0,777	1,824	0,508	-1,0652	-0,5267
V ($e_W=0,6$)	0,100	0,484	0,773	1,760	0,430	0,0631	0,4733
VI ($e_j=0,2$)	0,102	0,464	0,777	1,819	0,439	-0,2889	-0,0534
заводской р.о.	0,097	0,355	0,720	1,000	1,000	–	–

В каждом варианте оптимизации значение целевой функции новой калибровки $Q_{\text{новой}}^{\text{po}}$ значительно лучше, значения целевой функции заводской калибровки $Q_{\text{заводской}}^{\text{po}}$. Для всех частных показателей эффективности f_j определены наилучшие значения, именно в том варианте, где тот или иной показатель был выбран в качестве «главной цели» оптимизации.

В таблице 4.23 представлено распределение коэффициентов обжарки по стенке швеллера $\frac{1}{\eta_i}$ в каждом проходе для оптимального режима обжарки по каждому варианту оптимизации.

Таблица 4.23 – Оптимальные режимы обжарки по шести выбранным вариантам
ОПТИМАЛЬНОСТИ

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
I ($e_p=0,6$)	1,368	1,299	1,312	1,384	1,780	1,830	2,070	1,378
II ($e_M=0,6$)	1,374	1,293	1,690	1,300	1,412	1,493	2,274	1,603
III ($e_T=0,6$)	1,357	1,274	1,701	1,767	1,354	1,770	1,780	1,353
IV ($e_{II}=0,6$)	1,372	1,296	1,645	1,992	1,100	1,662	2,065	1,364
V ($e_w=0,6$)	1,357	1,300	1,750	1,895	1,971	1,200	1,835	1,182
VI ($e_j=0,2$)	1,357	1,307	1,617	1,721	1,451	1,515	2,000	1,382

Для расчета рабочей калибровки выбран VI вариант оптимизации. Этот вариант позволяет учесть влияние всех частных показателей эффективности f_j в равной степени, а значит считается наиболее универсальным.

Размеры калибров и основные характеристики формоизменения были получены во время поиска оптимальных режимов обжарки. Для VI варианта оптимизации они представлены в таблицах 4.24–4.25.

Таблица 4.24 – Расчетные размеры калибров и характеристики формоизменения оптимальной калибровки швеллера 24У при VI варианте оптимальности

$N_{кл}$	N_k	N_{II}	$N_{ш}$	$N_{кк}$	Стенка			Действительные фланцы					Ложные фланцы		ω , мм ²
					$\frac{1}{\eta}$	d , мм	$l_{ст}$, мм	$\frac{1}{\eta_b}$	b , мм	$\frac{1}{\eta_a}$	a , мм	$l_{ф}$, мм	$h_{л}$, мм	$b_{л}$, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
обж	I ящичный	12	11		1,282	$B_d = 280$ мм, $B_6 = 287$ мм, $H_{вр} = 89,5$ мм, $s = 16$ мм									
		11	10		1,393	$B_d = 280$ мм, $B_6 = 287$ мм, $H_{вр} = 62$ мм, $s = 16$ мм									

Продолжение таблицы 4.24

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
обж	ящичный П	10	9		1,077	$B_d = 150 \text{ мм}, B_6 = 168,6 \text{ мм}, H_{вп} = 122 \text{ мм}, s = 16 \text{ мм}$									
обж		9	8		1,083	$B_d = 150 \text{ мм}, B_6 = 168,6 \text{ мм}, H_{вп} = 112 \text{ мм}, s = 16 \text{ мм}$									
обж	III	8	7		1,382	108,5	202,5	-	93,0	-	71,1	56,9	30,2	77,2	3359 6
I	1	7	6		2,000	54,2	210,6	1,010	92,1	1,300	54,7	66,1	22,2	77,4	23544
I	2	6	5		1,515	35,8	217,8	1,212	76,0	1,364	40,1	73,0	18,9	78,4	18031
I	3	5	4		1,451	24,7	224,0	1,451	52,4	1,451	27,6	79,4	15,9	53,9	12825
II	4	4	3		1,721	14,3	229,3	1,721	30,4	1,721	16,1	91,1	10,4	37,4	7921
II	5	3	2		1,617	8,9	233,6	1,617	18,8	1,617	8,5	91,1	7,9	28,8	4912
II	6	2		1	1,307	6,8	237,0	1,307	16,7	1,118	9,5	84,7	6,4	20,9	3942
III	7	1	1		1,357	5,0	239,4	1,357	12,3	1,357	7,0	87,0	-	-	2876

Таблица 4.25 – Энергосиловые параметры прокатки швеллера 24У на стане 800 по оптимальному режиму обжатий при VI варианте оптимальности

№	Клеть	$H_{1с}$, мм	$B_{1с}$, мм	D_k , мм	U , м/с	n , об/мин	$t_{сер.полосы}$	σ , МПа	p , МПа	F , мм ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	обжимная	195	265	811,0	5,7	90	1250,0	53,29	75,1	43209,0
2		140	280	863,2	7,3	90	1247,5	57,10	84,1	22664,1
3		260	145	745,7	3,0	90	1245,6	41,08	67,5	7394,8
4		240	150	768,6	3,4	90	1240,0	43,7	63,4	8050,3
5		134,5	249,8	870,5	4,1	90	1234,6	46,5	80,5	19972,7
6	I	69,8	337,4	780,2	19,2	155	1213,7	77,3	76,3	46648,0

Продолжение таблицы 4.25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	I	58,8	306,6	791,2	15,4	155	1209,1	63,1	89,7	21213,5
8		37,4	343,3	812,6	25,8	155	1200,8	79,2	68,4	30337,6
9	II	16,5	368,3	833,5	40,7	155	1175,5	95,8	22,8	33170,9
10		14,7	333,8	835,3	26,9	155	1144,8	74,6	134,4	9584,7
11		11,7	335,7	838,3	39,0	155	1092,0	99,2	95,3	11816,3
12	III	11,5	244,9	838,5	15,4	170	1005,3	75,9	101,3	2934,9

Продолжение таблицы 4.25

№	Клеть	P , МН	Ψ_{II}	$M_{вал}$, кН·м	$M_{пр}$, кН·м	$N_{пр}$, кВт	W_i , кВт·ч/т	ΣW , кВт·ч/т	L , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	обжимная	3,2	0,439	389,4	582,1	5486,0	0,82	8,74	6,0
2		1,9	0,426	344,3	333,3	3141,5	0,54		7,7
3		0,5	0,666	91,6	81,9	771,6	0,20		8,1
4		0,5	0,477	99,6	69,7	657,3	0,17		8,6
5		1,6	0,372	98,4	174,0	1640,1	0,40		9,1
6	I	3,6	0,354	400,4	541,8	8794,1	1,47		13,0
7		1,9	0,459	115,1	190,7	3095,0	0,73		17,0
8		2,1	0,397	153,7	236,2	3834,5	1,15		23,9
9	II	0,8	0,327	46,3	76,4	1240,3	0,51		50,3
10		1,3	0,483	34,0	85,2	1382,3	1,20		62,3
11		1,1	0,337	26,8	71,5	1160,7	1,24		77,7
12	III	0,3	0,540	3,2	15,1	268,2	0,33		106,3

Используя данные расчетов, приведенные в таблице 4.24, построена оптимальная рабочая калибровка для прокатки швеллера 24У на РБС ОАО «ЕВРАЗ НТМК», схема которой показана на рисунке 4.12.

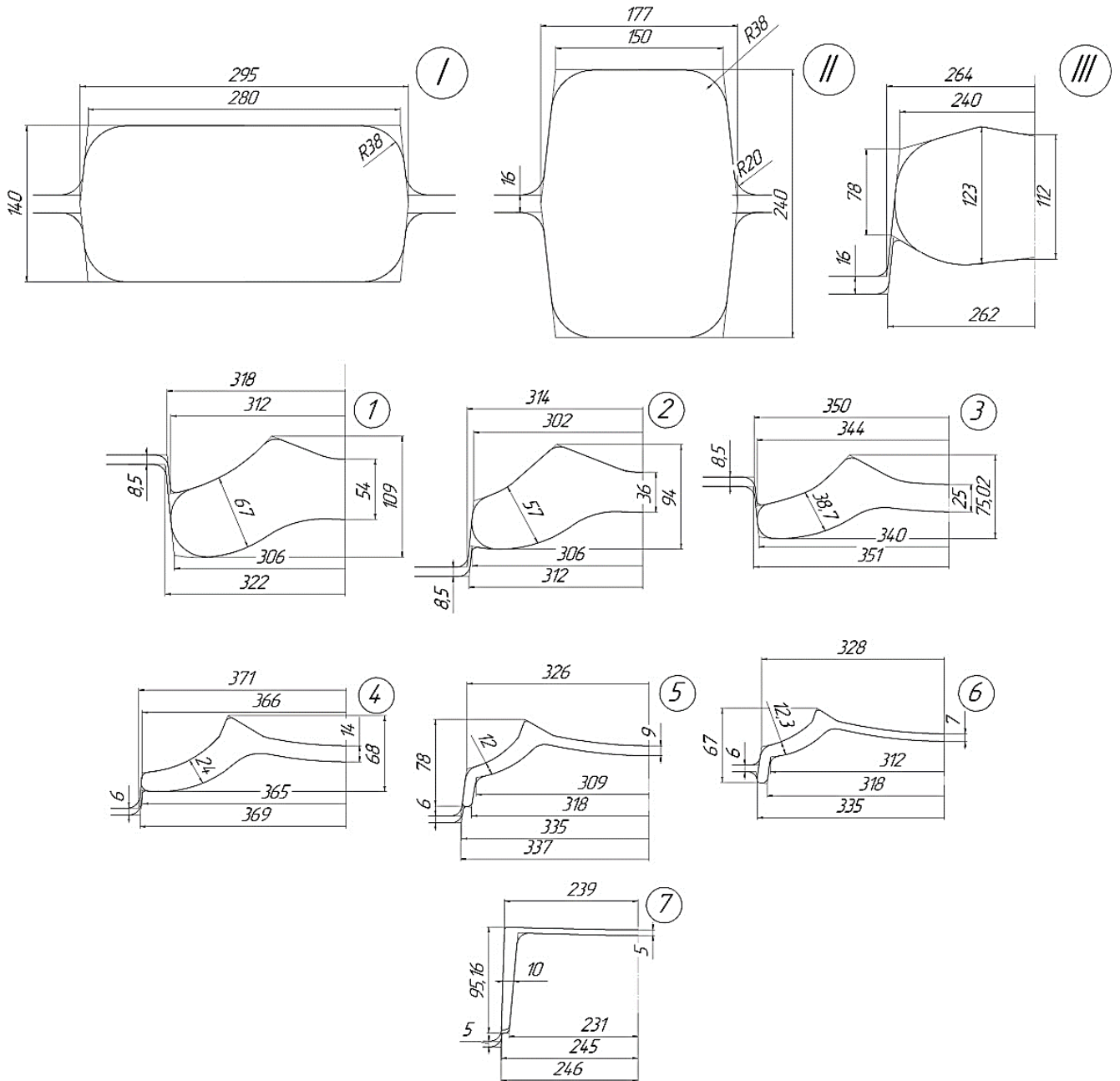


Рисунок 4.12 – Схема оптимальной развернутой калибровки валков для прокатки швеллера №24У РБС ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

Чертежи калибров и монтажные чертежи валков РБС приведены в приложении Д и приложении Е, соответственно.

Благодаря использованию новой рациональной развернутой калибровки производительность стана увеличится в 1,8 раз, что демонстрируется приведенными на рисунке 4.13 графиками Адамецкого. Энергозатраты на прокатку швеллера 24У снизятся примерно в 2,3 раза. Сопоставление энергозатрат

на прокатку в каждом проходе приведено в таблице 4.26. Температура конца прокатки повысится на 71°С

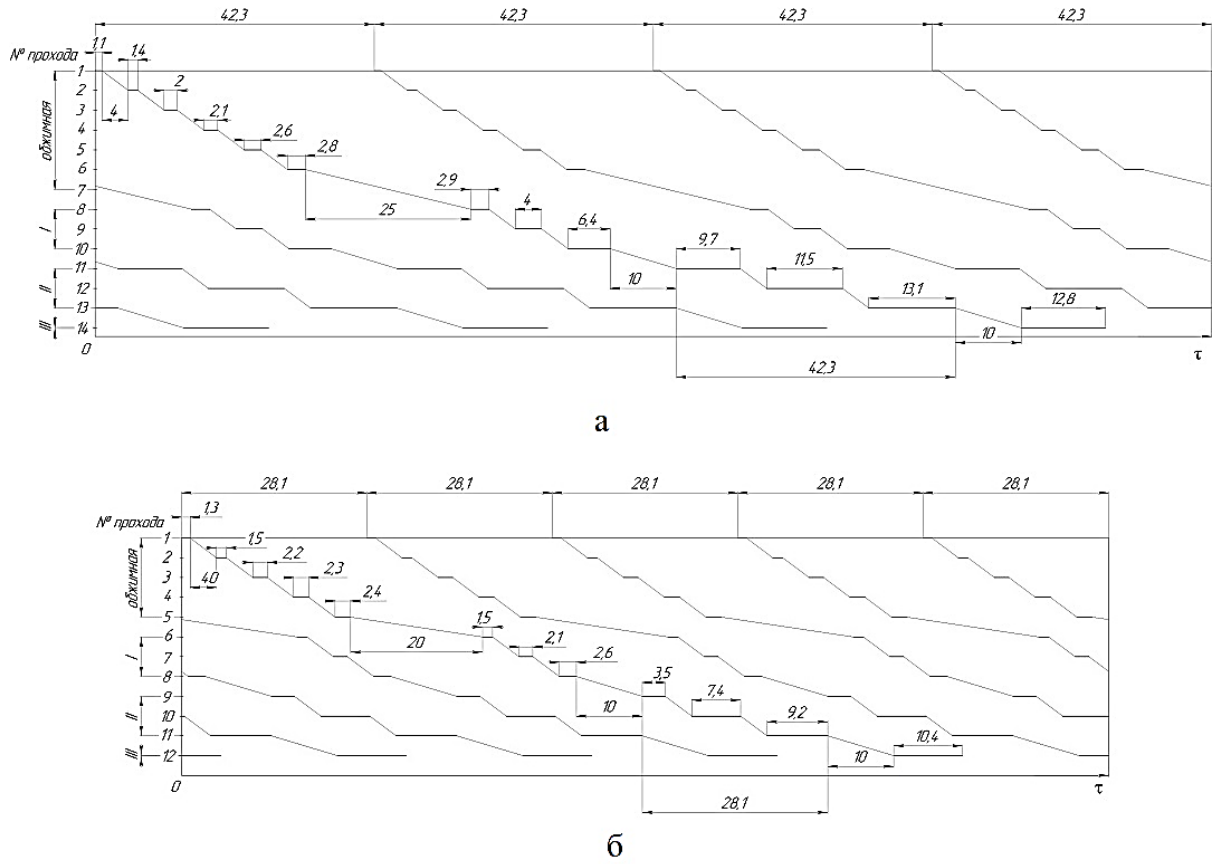


Рисунок 4.13 – Графики Адамецкого: а – заводская калибровка, б – новая калибровка

Таблица 4.26 – Энергозатраты на прокатку швеллера 24У

Заводская калибровка				Новая калибровка			
Клеть	№ прохода	W_i , кВт·ч/т	ΣW , кВт·ч/т	Клеть	№ прохода	W_i , кВт·ч/т	ΣW , кВт·ч/т
1	2	3	4	5	6	7	8
Обжимная	1	0,84	19,29	Обжимная	1	0,82	8,74
	2	0,65			2	0,54	
	3	0,33			3	0,20	
	4	0,84			4	0,17	
	5	0,54			5	0,40	
	6	1,30					
	7	1,78					

Продолжение таблицы 4.26

1	2	3	4	5	6	7	8
I	8	1,81		I	6	1,48	
	9	1,58			7	0,73	
	10	1,74			8	1,15	
II	11	2,06		II	9	0,51	
	12	2,58			10	1,20	
	13	3,24			11	1,24	
III	14	0,84		III	12	0,33	

4.3 Выводы по главе

- 1) Проведен анализ «заводской» калибровки валков для швеллера №24У на рельсобалочном стане 800 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» по характеристикам формоизменения, энергосиловой загрузке стана, производительности и температуры конца прокатки. Выявлены имеющиеся недостатки и возможные пути совершенствования.
- 2) Для существующих на стане оборудования, технологии и используемой заготовки проведен поиск оптимальной схемы калибровки с использованием сформулированных в главе 3 показателей эффективности и целевой функции. Наилучшим показателям отвечает развернутая схема (ТСК–2) с применением калибров с двойным уклоном действительных фланцев.
 - За счет возможности более интенсивного прямого обжатия полок в развернутых калибрах удалось сократить количество калибров необходимых для производства этого швеллера.
 - Значение целевой функции используемого критерия оптимальности новой схемы калибровки составляет $Q_{\text{новая}}^{\text{СК}} = 0,0041$, что значительно больше заводского значения $Q_{\text{заводская}}^{\text{СК}} = 0,0027$ в 1,5 раз (условие оптимальности схемы калибровки $Q_{\text{СК}} \rightarrow \max$).

- 3) Для выбранной рациональной схемы калибровки рассмотрено 6 вариантов оптимальных режимов обжати, каждый из которых следует применять в зависимости от актуальных на текущий момент времени технико-экономических условий. Для оптимизации режимов обжати использованы показатели эффективности и целевая функция, сформулированные в главе 3. Любой из новых оптимальных вариантов режимов обжати существенно лучше режима обжати заводской калибровки по сформулированному в главе 3 критерию режима обжати.
- 4) Для универсального оптимального режима обжати (с равными величинами коэффициентов значимости показателей эффективности при расчете целевой функции оптимальности) рассчитана и построена рабочая калибровка валков и монтажные чертежи калибров на валках. Этот вариант оптимизации лучше заводского в $\frac{Q_{\text{новой}}^{\text{po}}}{Q_{\text{заводской}}^{\text{po}}} = \frac{-0,2889}{-0,0534} = 5,4$ раз.
- 5) Наиболее значимые отличия новой калибровки от заводского варианта:
- увеличение теоретической производительности примерно в 1,8 раз;
 - снижение энергозатрат примерно в 2,3 раза;
 - повышение температуры конца прокатки до 1005°C, т.е. на 71°C (за счет чего можно снизить температуру нагрева заготовки).
- 6) Рациональная калибровка передана АО «ЕВРАЗ НТМК» для последующего освоения и внедрения. Разработанная методика проектирования и оптимизации передана АО «ЕВРАЗ НТМК» (приложение Ж).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

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 получения наилучшей швеллерной калибровки, 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 (первый критерий), использующий многоцелевую функцию. Для ее формирования выделено 14 показателей эффективности, каждый из которых отражает одну из возможных целей оптимизации, присущих современному сортопрокатному производству (при практическом использовании 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 (второй 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 так же может быть, как сокращен, так и расширен при практическом использовании).

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

2. Разработана новая оптимальная калибровка валков для прокатки швеллера 24У на стане 800 РБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК» как альтернатива используемой в настоящее время 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, по расчетам, 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°C, 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. Есть и другие преимущества.

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 огромные 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калугина, О. Б. Оптимизация формы вытяжных калибров по критерию эффективности деформации с целью энергосбережения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Калугина Ольга Борисовна. Магнитогорск. – 2013. – 19 с.
2. Калугина, О. Б. Численное решение задачи оптимизации формы вытяжных калибров / О. Б. Калугина // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013 – № 2. – С. 47–49.
3. Левандовский, С. А. Опыт оптимизации формы калибров по критерию неравномерности деформации / С. А. Левандовский, О. В. Сеницкий, Н. А. Ручинская // Калибровочное бюро. – 2014. – № 3. – С. 52–80.
4. Кинзин, Д. И. К вопросу об оптимизации калибровки валков простых сортовых профилей по критерию энергоэффективности / Д. И. Кинзин, Д. А. Назаров, Г. К. Рожков // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2019. – № 3 (30). – С. 35–38.
5. Кинзин, Д. И. Разработка оптимального режима обжатий по критерию минимума работы деформации при бескалибровой прокатке / Д. И. Кинзин, М. А. Рошка, С. С. Рычков // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2012. – № 18. – С. 200–204.
6. Bours, A.-L. Structural member stability behaviour of steel channel / A.-L. Bours, R. Winkler, M/ Knobloch. – doi: 10.1002/cepa.1524 // Ce/papers. – 2021. – Vol. 4. – pp. 2078–2085.
7. Буданов, И. А. Металлургия в процессе экономического роста в России / И. А. Буданов // Проблемы прогнозирования. – 2005. – № 2. – С. 63–78.
8. ГОСТ 8240-97. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент. – Введ. 2002-01-01. – М. : Стандартинформ. – 2001. – 10 с.
9. ГОСТ 19425-74. Балки двутавровые и швеллеры стальные специальные. Сортамент. – Введ. 1975-01-01. – М. : Стандартинформ. – 1975. – 4 с.
10. ГОСТ 5267.1-90. Швеллеры. Сортамент. – Введ. 1991-07-01. – М. : Стандартинформ. – 1991. – 2 с.

11. ГОСТ 21026-75. Швеллеры стальные горячекатаные с отогнутой полкой для вагонеток. Сортамент. – Введ. 1977-01-01. – М. : Стандартиформ. – 1977. – 2 с.
12. ГОСТ 8278-83. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент. – Введ. 1984-01-01. – М. : Стандартиформ. – 1984. – 8 с.
13. ГОСТ 8281-80. Швеллеры стальные гнутые неравнополочные. Сортамент. – Введ. 1981-01-01. – М. : Стандартиформ. – 1981. – 7 с.
14. Шемшурова, Н. Г. Перспективы развития производства гнутых профилей в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) / Н. Г. Шемшурова, Н. М. Локотунина, В. Г. Антипанов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2005. – № 3. – С. 58–61.
15. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – Введ. 2008-07-01. – М. : Стандартиформ. – 2008. – 11 с.
16. ГОСТ 19281–2014. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартиформ. – 2015. – 50 с.
17. ГОСТ 535-2005. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. – Введ. 2008-07-01. – М. : Стандартиформ. – 2008. – 17 с.
18. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 5. / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев. – Днепропетровск : Днепро-ВАЛ, 2002. – 482 с.
19. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков : учебное пособие для вузов. Изд. 2-е испр. и доп. / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – М. : Теплотехник, 2010. – 490 с.
20. Gupta, N. K. Steel Rolling. Principle, Process & Application / Gupta N. K. – London. – 2021. – P. 526. – ISBN 9781003182399.
21. Yershov, S. D. A review and technology analysis of rolling channel sections in rolling mills in the CIS / S. D. Yershov, S. Mel'nik, E. Kravchenko. – doi:10.18052/www.scipress.com/IJET.6.8 // International Journal of Engineering and Technologies. – 2016. – Vol. 6. – pp. 8–19.

22. Пат. № 2294246 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/088. Способ прокатки крупных швеллеров в черновых калибрах / С. П. Гришин, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО "Новокузнецкий металлургический комбинат". – № 2005123883/02 ; заявл. 27.07.05 ; опубл. 27.02.07, Бюл. № 6. – 4 с. : ил.

23. Бергеман, Г. В. Технологические особенности производства крупногабаритного швеллерного профиля U-260 в условиях рельсобалочного стана «800» / Г. В. Бергеман // Металл и литье Украины. – 2015. – № 5 (264). – С. 3–6.

24. Пат. 0065533 Германия, МПК В 21 В 1/095. Method for rolling a u-shaped steel bar or similar and beam-making universal mill train for implementing such method / Н. W. Schepek ; заявитель и патентообладатель MANNESMANN Aktiengesellschaft. – № 3040325 ; заявл. 25.10.80 ; опубл. 10.04.85, Бюл. № 85/15. – 13 с. : ил.

25. Пат. 10–2009–0069819 Корея, МПК В 21 В 1/08, В 21 В 1/095. Method manufacturing U-shaped steel / J. Seol, P. Yong-geun ; заявитель и патентообладатель Hyundai Steel Co., Ltd. – № 10–2007–0137620 ; заявл. 26.12.07 ; опубл. 01.07.09. – 42 с. : ил.

26. Пат. 10–0532511 Южная Корея, МПК В 21 В 1/00. Method of rolling finished sections from preliminary sections in reversing roll stand arrangements / Н. J. Novak, G. Engel, U. Svezikosky ; заявитель и патентообладатель S. M. S. Demag Aktiengesellschaft. – № 10–1997–0065876 ; заявл. 04.12.97 ; опубл. 24.11.05. – 7 с. : ил.

27. Диомидов, Б. Б. Технология прокатного производства : учебное пособие для вузов / Б. Б. Диомидов, Н. В. Литовченко. – М. : Металлургия, 1979. – 488 с.

28. Пат № 2272683 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки швеллеров / А. А. Морозов, В. Г. Кузнецов, В. А. Авдонин [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат". – № 2004127621/02 ; заявл. 15.09.04 ; опубл. 27.03.06, Бюл. № 9. – 4 с. : ил.

29. Пат. № 2356656 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки швеллеров / Г. С. Сеничев, А. В. Титов, В. Г. Логинов [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат". – № 2007144958/02 ; заявл. 03.12.07 ; опубл. 27.05.09, Бюл. № 15. – 7 с. : ил.

30. Луцкий, М. Б. Совершенствование технологии производства швеллера № 14 / М. Б. Луцкий, И. К. Дорожко, А. А. Чичкан и др. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 21. – Алчевск : ДонГТУ, 2006. – С. 109–114.

31. Пат. № 2301118 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ производства швеллеров / А. Н. Луценко, В. В. Никифоров, В. А. Монида [и др.]. ; заявитель и патентообладатель ОАО "Северсталь". – № 2005126772/02 ; заявл. 24.08.05 ; опубл. 27.02.07, Бюл. № 17. – 5 с. : ил.

32. Пат. № 0475703 Япония, МПК В 21 В 1/095. Method and line of device for hot rolling channel steel / Т. Nichino; заявитель и патентообладатель Nippon Steel Corp. - № 18788890 ; заявл. 18.07.90 ; опубл. 10.03.92. – 5 с. : ил.

33. Пат. № 2169050 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ производства швеллеров / А. Я. Кузовков, В. Н. Калягин, В. В. Бородин [и др.]. ; заявитель и патентообладатель ОАО "Нижнетагильский металлургический комбинат". – № 99109420/02 ; заявл. 27.04.99 ; опубл. 20.03.01, Бюл. № 17. – 8 с. : ил.

34. Луцкий, М. Б. Технология прокатки швеллеров с применением фасонных калибров, имеющих переменный изгиб стенки / М. Б. Луцкий, И. К. Дорожко, В. А. Луценко и др. // Труды третьего конгресса прокатчиков. – 2000. – С. 253–256.

35. Sakhaei, A. H. Investigations into the roll pass design of channel section beams in conventional rolling / A. H. Sakhaei, M. Salimi, M. Kadkhodaei // 18th Annual international conference on mechanical engineering – ISME 2010. – 2010. – pp. 238–242.

36. Пат. 2132247 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки швеллеров / Г. Н. Юнин, Е. Л. Кравченко, И. А. Шарапов [и др.]. ; заявитель и

патентообладатель АО "Кузнецкий металлургический комбинат". – № 98100643/02 ; заявл. 06.01.98 ; опубл. 27.06.99. – 4 с. : ил.

37. Пат. 2111803 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки швеллеров / В. А. Монид, А. И. Трайно, В. Т. Рябинков [и др.]. ; заявитель и патентообладатель ОАО "Северсталь". – № 98100643/02 ; заявл. 03.06.97 ; опубл. 27.05.98, – 8 с. : ил.

38. Пат. 2288049 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/095. Способ прокатки крупных швеллеров в клети трио / Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев, С. В. Степанов [и др.]. ; заявитель и патентообладатель ОАО "Новокузнецкий металлургический комбинат". – № 2005113651/02 ; заявл. 04.05.05 ; опубл. 27.11.06, Бюл. № 33. – 4 с. : ил.

39. Пат. 2268788 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ калибровки швеллеров / В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, С. П. Гришин [и др.]. ; заявитель и патентообладатель ОАО "Новокузнецкий металлургический комбинат". – № 2004121512/02 ; заявл. 13.07.04 ; опубл. 27.01.06, Бюл. № 3. – 8 с. : ил.

40. Пат. 10-2015-0018032 Корея, МПК В 21 В 1/095, В 21 В 45/02, В 21 В 43/10, В 21 В 37/76. Device for the manufacture of C-shaped steel and the method of manufacture/ P. Chun-soo, K. Ki-won, H. Sang-woo ; заявитель и патентообладатель Dongkuk Steel Co., Ltd. – № 10-2013-0094422 ; заявл. 08.08.13 ; опубл. 23.02.15. – 13 с. : ил.

41. Чичкан, А. А. Разработка элементов теории и технологии производства швеллеров с применением в фасонных калибрах переменного изгиба стенки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Чичкан Артур Алексеевич. Донецк, 2000. – 23 с.

42. Старченко, Д. И. Развернутая калибровка фасонных профилей / Д. И. Старченко. – М. : Металлургиздат, 1952. – 248 с.

43. Старченко, Д. И. Развернутая калибровка фасонных профилей / Д. И. Старченко. – М. : Металургиздат, 1964. – 162 с.

44. Старченко, Д. И. Эффективность применения развернутой калибровки при прокатке швеллеров / Д. И. Старченко, А. М. Савченко, Т. Ф. Власов [и др.] // Улучшение качества проката : сб. – Донецк. – 1968. – С. 25–31.
45. Жадан, В. Т. Эффективный способ прокатки фасонных профилей / В. Т. Жадан, В. Е. Стефанов. – М. : Metallurgiya, 1970. – 216 с.
46. Кочетов, И. М. Калибровка валков с применением систем развернутых калибров / И. М. Кочетов. – М. : Metallurgiya, 1971. – 112 с.
47. Жадан, В. Т. Прокатка швеллера №30 по способу постепенного сгибания / В. Т. Жадан, В. Е. Стефанов // Сталь. – 1969. – № 2. – С. 158–159.
48. Сухомлин, С. А. Новая концепция совершенствования технологического процесса прокатки фасонных профилей и модернизации оборудования линейных рельсобалочных прокатных станов. Сообщение 1 / С. А. Сухомлин // Metall и литье Украины. – 2016. – № 3 (274). – С. 17–22.
49. Бергеман, Г. В. Развитие методов развернутой калибровки валков и разработка эффективной технологии проката швеллеров / Г. В. Бергеман, С. М. Антонюк, В. Н. Данченко, М. В. Краев // Научные труды Донецкого национального технического университета. – 2008. – № 10. – С. 190–195.
50. Бергеман, Г. В. Особенности применения развернутой калибровки швеллеров при производстве профиля U200 в условиях стана «550» / Г. В. Бергеман, С. М. Антонюк, А. А. Самсоненко // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 6. – С. 50–52.
51. Бергеман, Г. В. Освоение производства крупногабаритного профиля швеллера № 30П в условиях среднесортного стана «550» / Г. В. Бергеман // Metall и литье Украины. – 2016. – № 2 (273). – С. 36–41.
52. Бергеман, Г. В. Современные технологии производства швеллеров с применением развернутой калибровки валков / Г. В. Бергеман, С. М. Антонюк, М. В. Краев [и др.]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2007. – 64 с. – ISBN 978-966-348-123-4.

53. Oginskii, I. K. Application of Four-roll Passes upon Rolling of Nonsymmetrical Flange Channel Sections / I. K. Oginskii, E. N. Smirnov, V. V. Kukhar' et al. // *Steel in Translation*. – 2021. – № 51. – pp. 564–568.

54. Пат. 2350408 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки швеллеров / Луценко А. Н., Мониц В. А., Никифоров В. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО "Северсталь". – № 2007130857/02; заявл. 13.08.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9. – 6 с. : ил.

55. Грудев, А. П. Технология прокатного производства : учебник для вузов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Metallurgy, 1994. – 656 с.

56. Дорожко, И. К. Освоение нового способа прокатки швеллеров на стане "600" / И. К. Дорожко, М. Б. Луцкий, В. А. Луценко [и др.] // *Сталь*. – 1998. – № 7. – С. 42–45.

57. Назаров, Д. В. Совершенствование технологии прокатки для повышения эксплуатационных свойств швеллеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Назаров Дмитрий Вячеславович. Магнитогорск. – 2009. – 19 с.

58. Дорофеев, С. В. Прогрессивные способы прокатки и конструкции калибров при производстве швеллеров и сортовых профилей / С. В. Дорофеев, В. В. Дорофеев, В. Е. Громов [и др.] // *Новые промышленные технологии и материалы* : сб. – Новосибирск. – 2000. – С. 171–180.

59. Есипов, В. Д. Прокатка специальных профилей сложной формы / В. Д. Есипов, Б. М. Илюкович, Ю. С. Чернобривенко. – К. : Техніка, 1985. – 192 с.

60. Пат. 2721265 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки швеллеров / Дорофеев В. В., Головатенко А. В., Добрянский А. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО "ЕВРАЗ ЗСМК". – № 2019130691; заявл. 26.09.19; опубл. 18.05.20, Бюл. № 14. – 14 с. : ил.

61. Бахтинов, Б. П. Калибровка балок и швеллеров / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. – М. : Metallurgizdat, 1950. – 181 с.

62. Бахтинов, Б. П. Калибровка прокатных валков / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. – М. : Metallurgizdat, 1953. – 785 с.

63. Зюзин, В. И. Технология прокатного производства : в 2 ч. / В. И. Зюзин, А. В. Третьяков. – М. : Metallurgiya, 1991. – 864 с.
64. Грудев, А. П. Технология прокатного производства : учебник для вузов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Metallurgiya, 1994. – 656 с.
65. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства : учебник для вузов / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – М. : Лань, 2020. – 528 с. – ISBN: 978-5-8114-2287-6.
66. Чекмарев, А. П. Калибровка прокатных валков : учебник для вузов / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – М. : Metallurgiya, 1971. – 510 с.
67. Литовченко, Н. В. Калибровка профилей и прокатных валков / Н. В. Литовченко. – М. : Metallurgiya, 1990. – 432 с.
68. Мерекин, Б. В. Некоторые вопросы калибровки прокатных валков / Б. В. Мерекин. – М. : Metallurgizdat, 1964. – 162 с.
69. Старченко, Д. И. Алгоритм развернутой остроугольной калибровки швеллерных профилей / Д. И. Старченко // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. / ЖДМИ. – 1969. – № 18. – С. 24–25
70. Скороходов, А. Н. Оптимизация прокатного производства / А. Н. Скороходов, П. И. Полухин, Б. М. Илюкович [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1983. – 432 с.
71. Чиченок, Н. А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением / Н. А. Чиченок, А. Б. Кудрин, П. И. Полухин. – М. : Metallurgiya, 1977. – 311 с.
72. Иванова, В. М. Математическая статистика : учебник для вузов / В. М. Иванова, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова [и др.]. – М. : Высшая школа, 1981. – 371 с.
73. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1980. – 208 с.
74. Геминтерн, Ю. Б. Методы оптимального проектирования / Ю. Б. Геминтерн, Б. М. Каган. – М. : Наука, 1971. – 159 с.

75. Федосеев, С. А. Оптимизация планирования прокатного производства / С. А. Федосеев // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 40–42.
76. Вусатовский, З. Основы прокатки / З. Вусатовский ; перевод с нем. Г. Т. Герман. – М. : Metallurgiya, 1967. – 584 с.
77. Бейнон, Р. Е. Калибровка валков и расположение прокатных станков / Р. Е. Бейнон ; перевод с англ. И. С. Победина. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 205 с.
78. Тулупов, О. Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортовой прокатки : монография / А. Н. Тулупов. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2002. – 224 с.
79. Тулупов, С. А. Структурно-матричное описание калибровки фланцевых профилей / С. А. Тулупов, О. Н. Тулупов, А. А. Зайцев. – Магнитогорск : Магнитогорск. гос. горно-металлург. акад., 1995. – 18 с.
80. Тулупов, С. А. Развитие матричного подхода к описанию процессов ОМД с целью адаптивного управления формоизменением / С. А. Тулупов, О. Н. Тулупов, А. Б. Моллер, А. А. Зайцев // Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века : Тез. докл. Межгосударств. науч.-техн. конф. – 1996. – С. 67–68.
81. Тулупов, О. Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.05 / Тулупов Олег Николаевич. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2001. – 404 с.
82. Моллер, А. Б. Адаптируемая матричная модель для повышения точности непрерывной сортовой прокатки : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.05 / Моллер Александр Борисович. – Магнитогорск : Магнитогорск. гос. горно-металлург. акад., 1996. – 158 с.
83. Смирнов, С. В. Оптимизация геометрических параметров валков для холодной прокатки / С.В. Смирнов, Г.А. Агасьянц // Металлообработка. – 2001. – №5. – С. 26–29.
84. Уманский, А. А. Оптимизация режимов прокатки на мелкосортном стане 250-2 / А. А. Уманский, Ю. А. Мартыанов // Металлург. – 2014. – № 6. – С. 516–523.

85. Зуев, И. А. Способы оптимизации формы чистовых калибров редуционно-калибровочного блока с целью увеличения точности геометрических размеров конечного профиля / И. А. Зуев, А. В. Стрельченко, Ю. Л. Бобарикин // Черная металлургия. – 2019. – №75 (2). – С. 222–226.

86. Рожков, Г. К. Оптимизация калибровки валков на основе мультипоточного вычислительного эксперимента / Г. К. Рожков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2020. – № 1. – С. 32–36.

87. Кинзин, Д. И. К вопросу об оптимизации калибровки валков простых сортовых профилей по критерию энергоэффективности / Д. И. Кинзин, Д. А. Назаров, Г. К. Рожков // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2019. – № 3 (30). – С. 35–38.

88. Кинзин, Д. И. Постановка и решение задачи оптимизации формы вытяжных калибров / Д. И. Кинзин // Прокатное производство. – 2014. – № 2. – С. 34–38.

89. Кинзин, Д. И. Оптимизация формы вытяжных калибров по критерию эффективности деформации с целью энергосбережения : монография / Д. И. Кинзин, О. Б. Калугина. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2015. – 51 с.

90. Кинзин, Д. И. Оптимизация формы вытяжных калибров по критерию максимума коэффициента эффективности деформации / Д. И. Кинзин // Черные металлы. – 2014. – № 6 (990). – С. 45–48.

91. Саранча, С. Ю. К вопросу энергоэффективности калибровки простых профилей: оптимизация и моделирование / С. Ю. Саранча, С. А. Левандовский // Калибровочное бюро. – 2017. – № 11. – С. 9–12.

92. Тулупов, О. Н. Калибровка простых сортовых профилей как решение задачи оптимального управления // Труды VIII конгресса прокатчиков. Магнитогорск. – 2010. – С. 230–235.

93. Левандовский, С. А. Опыт оптимизации формы калибров по критерию неравномерности деформации / С. А. Левандовский, О. В. Сеницкий, Н. А. Ручинская // Калибровочное бюро. – 2014. – № 3. – С. 52–80.

94. Lambiase, F. A new procedure based on an expert system software for roll pass design in square and round rebar rolling / F. Lambiase, M. Durante, A. Langella [at al.] // 18th International Conference on Production Research. – 2005.
95. Lambiase, F. Optimization of shape rolling sequences by integrated artificial intelligent techniques / F/ Lambiase // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 68. – P. 443–452.
96. Huang, B. Development of parameterized roll pass design based on a hybrid model / B. Huang, K. Xing, S. Spuzic [at al.] // 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology. – 2010. – P. 91–93.
97. Lambiase, F. Automated Procedure for Roll Pass Design // F. Lambiase, A. Langella // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2009. – № 18. – P. 263–272.
98. Huang, B. Investigation of Roll Pass Optimal Design Based on IGA / B. Huang, K. Xing, K. Abhary [at al.] // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 211–212. – P. 195–199.
99. Spuzic, S. Roll pass design optimization / S. Spuzic, R. Narayanan, Z. Kovacic [at al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – № 91. – P. 999–1005.
100. Abhary, K. The application of a hybrid algorithm to roll pass design / K. Abhary, Z. Kovacic, S.-E. Lundberg [at al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 79. – P. 1063–1070.
101. Huang, K. Towards energy efficient shape rolling: roll pass optimal design and case studies / K. Huang, B. Huang, L. Fu [at al.] // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – № 32. – P. 44–55.
102. Фомин, А. В. Разработка метода автоматизированного расчета и внедрение оптимальных технологических режимов прокатки швеллеров : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Фомин Анатолий Валентинович. – Свердловск : Урал. политехн. ин-т им. С. М. Кирова, 1990. – 194 с.
103. Тлустенко, С. Ф. Исследование влияния технологических параметров прокатки на оптимизацию программ настроек стана / С. Ф. Тлустенко // Вестник

Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 1 (25). – С. 101–109.

104. Карнаушенко, Н. А. Проблемы оптимизации режима деформации на слябинге / Н. А. Карнаушенко, А. В. Васекин // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2000. – № 10. – С. 121–123.

105. Капланов, В. И. Оптимизация режима деформации при контролируемой прокатке с целью снижения расхода электроэнергии / В. И. Капланов, В. В. Володарский, А. Г. Курпе // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2003. – № 13. – С. 127–132.

106. Кинзин, Д. И. Совершенствование методики определения показателей формоизменения металла для управления качеством профилей при прокатке в калибрах / Д. И. Кинзин, С. А. Левандовский, А. В. Наливайко [и др.] // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2009. – № 4. – С. 54–56.

107. Левандовский, С. А. Оптимизация режимов формоизменения на современных непрерывных сортовых станах / С. А. Левандовский, А. Б. Моллер, О. Н. Тулупов // Наука и производство Урала: сб. тр. межрегион. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новотроицк : МИСиС, 2005. – С. 55–57.

108. Abhary K. A knowledge based hybrid model for improving manufacturing system in rolling mill / K. Abhary, K. Garner, Z. Kovacic [at al.] // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 443. – P. 3–8.

109. Spuzic, S. Big Data Model – An Application to Design of Rolling Process / S. Spuzic, R. Narayanan, P. Gudimetla // MATEC Web of Conferences. – 2016. – 16 p.

110. Wang, Q. Design and optimization of rolling mills pass based on parameterization and orthogonal test / Q. Wang, P. Huang, Y. Yin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 112. – P. 803–818.

111. Lapovok, R. Ye. The mathematical basis of optimal roll pass design / R. Ye. Lapovok, P. F. Thomson // V-st Biennial Engineering Mathematics Conference. Melbourne. – 1994. – P. 1–9.

112. Садовский, В. Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития / В. Н. Садовский. – М. : Наука, 1980. – 348 с.

113. Качала, В. В. Основы теории систем и системного анализа : учебное пособие для вузов / В. В. Качала. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 210 с.

114. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский. – М. : Наука, 1966. – 308 с.

115. Михайленко, А. М. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 1. Основные положения / А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – № 1. – С. 21–27.

116. Михайленко, А. М. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Оптимизационная модель и пространство калибров / А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц, Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова) // Труды XI Конгресса прокатчиков. Том I. – 2017. – С. 283–295.

117. Смирнов, В. К. Обобщенная модель сортовой двухвалковой прокатки. Аналитическое описание калибра и заготовки / В. К. Смирнов, А. М. Михайленко, Е. И. Устинова (Е. И. Салихянова) // Труды XI Конгресса прокатчиков. Том I. – 2017. – С. 309–318.

118. 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 // Материалы XVII Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ. – 2017. – С. 660–664.

119. 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 // Материалы III молодежной научно-практической конференции Magnitogorsk Rolling Practice. – 2018. – С. 52–54.

120. Устинова, Е. И. (Салихянова, Е. И.). Выбор оптимальной схемы калибровки валков, как первого этапа оптимизации / Е. И. Устинова (Е. И.

Салихьянова), А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018. – №1. – С. 72–82.

121. Устинова, Е. И. (Салихьянова, Е. И.). Оптимизация схемы деформации металла при прокатке швеллеров / Е. И. Устинова (Е. И. Салихьянова), А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // XIX Международная научно-техническая Уральской школа-семинар металлургов-молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ. – 2018. – С. 505–509.

122. Шварц Д. Л. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 1. Общие положения / Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, Е. И. Устинова (Е. И. Салихьянова) // Черные металлы. – 2019. – № 9. – С. 4–8.

123 Устинова, Е. И. (Салихьянова, Е. И.). Обобщенная модель сортовой двухвалковой прокатки. Геометрия очага деформации / А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц, С. О. Непряхин, Е. И. Устинова (Е. И. Салихьянова) // XII международный конгресс прокатчиков. – Выкса. – 2019. – С. 216–223.

124. Устинова, Е. И. (Салихьянова, Е. И.). Модуль НСИ проектирования калибровки валков швеллера / И. О. Гелеверя, С. П. Куделин, Е. И. Устинова (Е. И. Салихьянова) // VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2019) с международным участием. – Екатеринбург. – 2019. – С 221–225.

125. 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.

126. Устинова, Е. И. (Салихьянова, Е. И.). Разработка блок-схемы концепции двухэтапной оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров / Е. И. Устинова (Е. И. Салихьянова), А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // Материалы IV молодежной научно-практической конференции Magnitogorsk Rolling Practice. – 2019. – С. 110–112.

127. 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 : Magnitogorsk State Technical University G. I. Nosova. – 2020. – P. 69–71.

128. 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 : Magnitogorsk State Technical University G. I. Nosova. – 2022. – P. 49–51.

129. Устинова, Е. И. (Салихьянова, Е. И.). Метод оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров. Пространство калибров / Е. И. Устинова (Е. И. Салихьянова), Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко // Сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рудненского индустриального института. – Рудный : Рудненский индустриальный институт. – 2019. – С. 497–509.

130. Schwartz, D. L. 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. – P. 657–665.

131. Хайкин, Б. Е. Построение аппроксимационных математических моделей в условиях обработки металлов давлением: учебное пособие / Б. Е. Хайкин. – Свердловск : УПИ, 1991. – 100 с.

132. Хайкин, Б. Е. Принцип симметрии в применении к математическим моделям процессов обработки металлов давлением / Б. Е. Хайкин // Обработка металлов давлением : межвуз. сб. науч. тр. Урал. политехн. ин-т им. С. М. Кирова. – 1990. – № 17. – С. 33–38.

133. Воронин, Ю. А. Теория классифицирования и ее приложения / Ю. А. Воронин. Новосибирск: Наука, 1985. – 232 с.

134. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента / Ф.С. Новик, Я. П. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.

135. Паршаков, С. И. Алгоритмизация и моделирование технических систем / С. И. Паршаков. – Екатеринбург : Издательство УРФУ, 2010. – 98 с.

136. Шварц, Д. Л. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 2. Пространство швеллерных калибров / Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, Е. И. Салихьянова // Черные металлы. – 2022. – № 4. – С. 27–33.

137. Шварц, Д. Л. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 3. Пространство схем швеллерных калибровок / Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, Е. И. Салихьянова // Черные металлы. – 2022. – № 7. – С. 16–21.

138. Кушнаренко, В. М. Дефекты и повреждения деталей и конструкций : монография / В. М. Кушнаренко, В. С. Репях, Е. Ю. Чирков [и др.]. – Оренбург: ОГУ, 2011. – 402 с.

139. ГОСТ 27674–88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Введ. 31-03-88. – М.: Госстандарт. – 1991. – 22 с.

140. Чекмарев, А. П. Износ прокатных валков / А. П. Чекмарев, Р. А. Машковцев. – Харьков : Metallurgizdat, 1955. – 148 с.

141. Бурдаков, Д. Д. Общая металлургия / Д. Д. Бурдаков, Ю. Д. Бурдаков, С. А. Володин. – М. : Металлургия, 1971. – 472 с.

142. Омельченко, А. В. Теория графов / А. В. Омельченков. Москва : МЦНМО, 2018. – 416 с.

143. Шляга, А. Ю. Многокритериальная оптимизация / А. Ю. Шляга // Вестник МГУП. – 2016. – №1. – С. 99–102.

144. Vasant, P. Handbook of research on modern optimization algorithms and applications in engineering and economics / P. Vasant, G.-W. Weber, V. N. Dieu. – IGI Global, 2016. – 960 p.

145. Munier, A. Hontoria E., Jimenez-Saez F. Strategic approach in multi-criteria decision making: a practical guide for complex scenarios / A. Munier, E. Hontoria, F. Jimenez-Saez. – Springer, 2019. – 288 p.

146. Орлов, А. И. Экспертные оценки / А. И. Орлов // Заводская лаборатория. – 1996. – №1. – С. 54–60.

147. Орлов, А. И. Теория принятия решений : учебное пособие / А. И. Орлов. – М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.

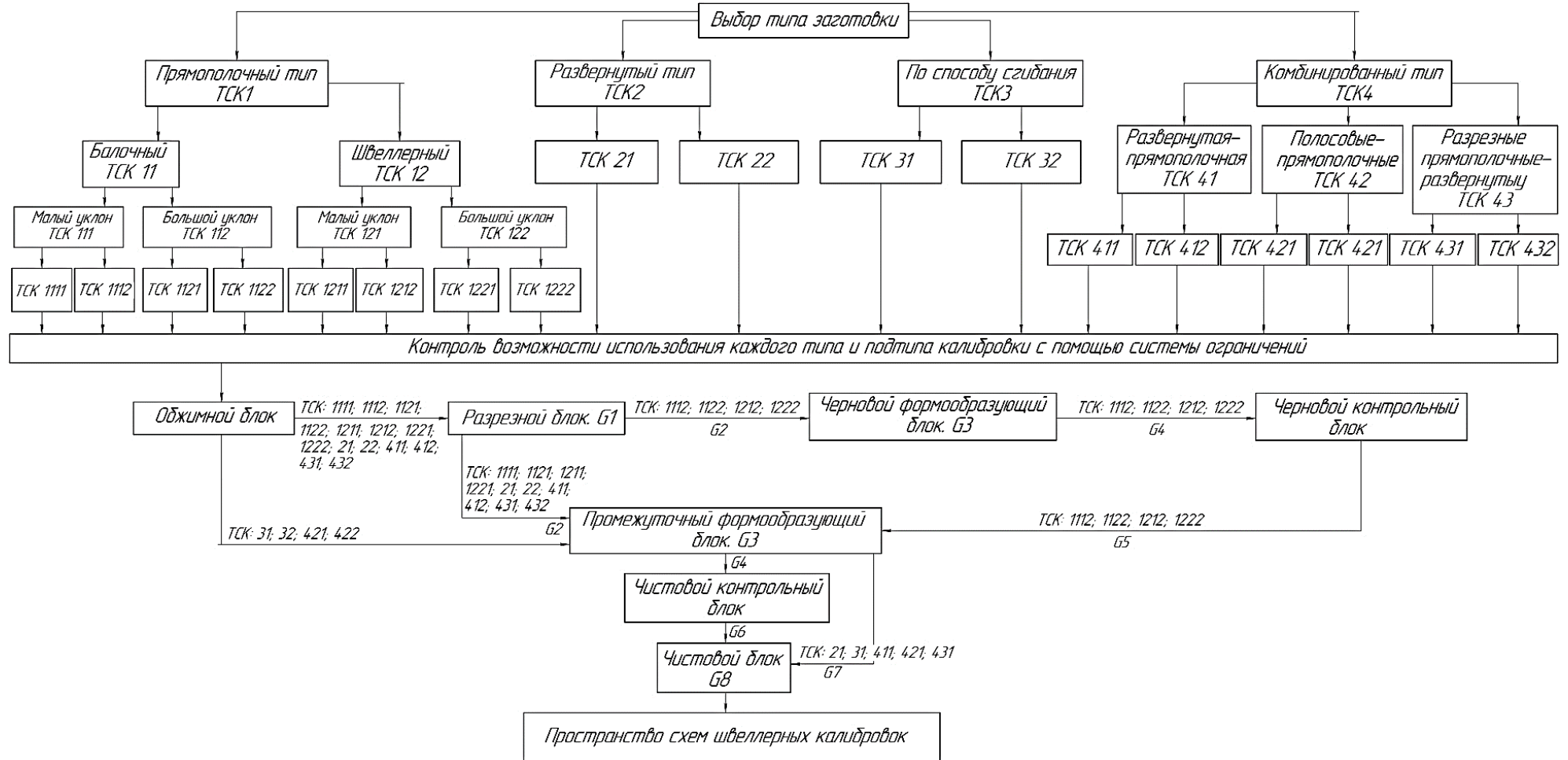
148. ТИ 102–П.С–138–2013. Прокатка профилей на рельсобалочном стане. Техническая инструкция. – Введ. 20.12.2012. – ОАО «ЕВРАЗ НТМК». – 2012. – 46 с.

149. Антипин, В. Г. Прокатные станы. Справочник. В 3 т. Т. 1 : Обжимные, заготовочные и сортопрокатные станы. Изд. 2-е перераб. и доп. / В. Г. Антипин, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров [и др.]. – М. :. Металлургия, 1992. – 429 с.

150. Королев, А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков / А. А. Королев. – Москва : Металлургия, 1985. – 376 с.

Приложение А

Блок-схема алгоритма генерации отдельной виртуальной схемы швеллерной калибровки валков



Приложение Б

Разбиение схем швеллерных калибров на блоки в зависимости от типа схемы калибровки

Б.1 Разбиение схем швеллерных калибров на блоки в прямоугольном типе схемы калибровки

ТСК	Под тип калибровки	Разрезной блок	Черновой формообразующий блок	Черновой контрольный калибр	Промежуточный формообразующий калибр	Чистовой контрольный калибр	Чистовой блок
Прямоугольный тип	ТСК 1111 = ТСК 1211	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135	Не используется	Не используется	1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 4114, 4115, 4124, 4125	1131, 1132, 1133, 3131, 3132, 3133, 4131, 4132, 4133	1134, 1135, 3134, 3135, 4134, 4135
	ТСК 1112 = ТСК 1212	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135	1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 4114, 4115, 4124, 4125	1111, 1112, 1113, 1121, 1122, 1123, 3111, 3112, 3113, 3121, 3122, 3123, 4111, 4112, 4113, 4121, 4122, 4123	1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 4114, 4115, 4124, 4125	1131, 1132, 1133, 3131, 3132, 3133, 4131, 4132, 4133	1134, 1135, 3134, 3135, 4134, 4135
	ТСК 1121 = ТСК 1221	2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225	Не используется	Не используется	1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	1231, 1232, 3231, 3232, 4231, 4232	1234, 1235, 3234, 3235, 4234, 4235
	ТСК 1122 = ТСК 1222	2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225	1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	1211, 1212, 121, 1222, 3211, 3212, 3221, 3222, 4211, 4212, 4221, 4222	1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	1231, 1232, 3231, 3232, 4231, 4232	1234, 1235, 3234, 3235, 4234, 4235

Б.2 Разбиение схем швеллерных калибров на блоки в развернутом типе схемы калибровки

ТСК	Под тип калибровки	Разрезной блок	Черновой формообразующий блок	Черновой контрольный калибр	Промежуточный формообразующий калибр	Чистовой контрольный калибр	Чистовой блок
Развернутый тип	ТСК 21	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2311, 2312, 2314, 2315, 2321, 2322, 2324, 2325, 2331, 2332, 2334, 2335	Не используется	Не используется	1311, 1312, 1315, 1321, 1322, 1325, 1332, 3311, 3312, 3315, 3321, 3325, 3322, 3332, 4311, 4312, 4315, 4321, 4322, 4325, 4332, 1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	Не используется	1134, 1135, 1234, 1235, 1331, 1335, 3134, 3135, 3234, 3235, 3331, 3335, 4134, 4135, 4234, 4235, 4331, 4335
	ТСК 22	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2311, 2312, 2314, 2315, 2321, 2322, 2324, 2325, 2331, 2332, 2334, 2335	Не используется	Не используется	1311, 1312, 1315, 1321, 1322, 1325, 1332, 3311, 3312, 3315, 3321, 3325, 3322, 3332, 4311, 4312, 4315, 4321, 4322, 4325, 4332, 1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	1334, 3324, 3334, 4334, 1131, 1132, 1133, 1231, 1232, 3231, 3232	1134, 1135, 1234, 1235, 1331, 1335, 3134, 3135, 3234, 3235, 3331, 3335, 4134, 4135, 4234, 4235, 4331, 4335

Б.3 Разбиение схем швеллерных калибров на блоки в схемы калибровки по способу сгибания

ТСК	Под тип калибровки	Разрезной блок	Черновой формообразующий блок	Черновой контрольный калибр	Промежуточный формообразующий калибр	Чистовой контрольный калибр	Чистовой блок
Калибровка по способу сгибания	ТСК 31	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2311, 2312, 2314, 2315, 2321, 2322, 2324, 2325, 2331, 2332, 2334, 2335	Не используется	Не используется	1311, 1312, 1315, 1321, 1322, 1325, 1332, 3311, 3312, 3315, 3321, 3325, 3322, 3332, 4311, 4312, 4315, 4321, 4322, 4325, 4332, 1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	Не используется	1134, 1135, 1234, 1235, 1331, 1335, 3134, 3135, 3234, 3235, 3331, 3335, 4134, 4135, 4234, 4235, 4331, 4335
	ТСК 32	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2311, 2312, 2314, 2315, 2321, 2322, 2324, 2325, 2331, 2332, 2334, 2335	Не используется	Не используется	1311, 1312, 1315, 1321, 1322, 1325, 1332, 3311, 3312, 3315, 3321, 3325, 3322, 3332, 4311, 4312, 4315, 4321, 4322, 4325, 4332, 1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	1131, 1132, 1133, 1231, 1232, 3131, 3132, 3133, 3231, 3232, 4131, 4132, 4133, 4231, 4232	1134, 1135, 1234, 1235, 1331, 1335, 3134, 3135, 3234, 3235, 3331, 3335, 4134, 4135, 4234, 4235, 4331, 4335

























Б.4 Разбиение схем швеллерных калибров на блоки в комбинированном типе схемы калибровки

ТСК	Под тип калибровки	Разрезной блок	Черновой формообразующий блок	Черновой контрольный калибр	Промежуточный формообразующий калибр	Чистовой контрольный калибр	Чистовой блок
Комбинированный тип	ТСК 411	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2311, 2312, 2314, 2315, 2321, 2322, 2324, 2325, 2331, 2332, 2334, 2335	Не используется	Не используется	1414, 1415, 1412, 1425, 1214, 1215, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 1114, 1115, 1124, 1125, 1214, 1215, 1224, 1225, 3114, 3115, 3124, 3125, 3214, 3215, 3224, 3225, 4114, 4115, 4124, 4125, 4214, 4215, 4224, 4225	Не используется	1134, 1135, 1234, 1235, 3134, 3135, 3234, 3235, 4134, 4135, 4234, 4235
	ТСК 412	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2311, 2312, 2314, 2315, 2321, 2322, 2324, 2325, 2331, 2332, 2334, 2335	Не используется	Не используется	1414, 1415, 1412, 1425, 1214, 1215, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 1114, 1115, 1124, 1125, 1214, 1215, 1224, 1225, 3114, 3115, 3124, 3125, 3214, 3215, 3224, 3225, 4114, 4115, 4124, 4125, 4214, 4215, 4224, 4225	1131, 1132, 1133, 1231, 1232, 3131, 3132, 3133, 3231, 3232, 4131, 4132, 4133, 4231, 4232	1134, 1135, 1234, 1235, 3134, 3135, 3234, 3235, 4134, 4135, 4234, 4235

























Комбинированный тип	ТСК 421	Не используется	Не используется	Не используется	1414, 1415, 1412, 1425, 1214, 1215, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 1114, 1115, 1124, 1125, 1214, 1215, 1224, 1225, 3114, 3115, 3124, 3125, 3214, 3215, 3224, 3225, 4114, 4115, 4124, 4125, 4214, 4215, 4224, 4225	Не используется	1134, 1135, 1234, 1235, 3134, 3135, 3234, 3235, 4134, 4135, 4234, 4235
	ТСК 422	Не используется	Не используется	Не используется	1414, 1415, 1412, 1425, 1214, 1215, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 1114, 1115, 1124, 1125, 3114, 3115, 3124, 3125, 1114, 1115, 1124, 1125, 1214, 1215, 1224, 1225, 3114, 3115, 3124, 3125, 3214, 3215, 3224, 3225, 4114, 4115, 4124, 4125, 4214, 4215, 4224, 4225	1131, 1132, 1133, 1231, 1232, 3131, 3132, 3133, 3231, 3232, 4131, 4132, 4133, 4231, 4232	1134, 1135, 1234, 1235, 3134, 3135, 3234, 3235, 4134, 4135, 4234, 4235

	ТСК 431	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135	Не используется	Не используется	1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225, 1311, 1312, 1315, 1321, 1322, 1325, 1332, 3311, 3312, 3315, 3321, 3325, 3322, 3332, 4311, 4312, 4315, 4321, 4322, 4325, 4332, 1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	Не используется	1134, 1135, 1234, 1235, 1331, 1335, 3134, 3135, 3234, 3235, 3331, 3335, 4134, 4135, 4234, 4235, 4331, 4335
	ТСК 432	2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2211, 2212, 2214, 2215, 2221, 2222, 2224, 2225, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135	Не используется	Не используется	1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225, 1311, 1312, 1315, 1321, 1322, 1325, 1332, 3311, 3312, 3315, 3321, 3325, 3322, 3332, 4311, 4312, 4315, 4321, 4322, 4325, 4332, 1214, 1215, 1224, 1225, 3214, 3215, 3224, 3225, 4214, 4215, 4224, 4225	1334, 3324, 3334, 4334, 1131, 1132, 1133, 1231, 1232, 3231, 3232	1134, 1135, 1234, 1235, 1331, 1335, 3134, 3135, 3234, 3235, 3331, 3335, 4134, 4135, 4234, 4235, 4331, 4335

























В. 2 Фрагмент графа G2 "Разрезные – формообразующие калибры"

Код калибра	<i>j</i>	1114	1115	1124	1125	1214	1215	1224	1225	1311
<i>i</i>	Пример калибра									
2111		1	1	0	0	1	1	0	0	1
2112		1	1	0	0	1	1	0	0	1
2113		1	1	0	0	1	1	0	0	1
2114		1	1	0	0	1	1	0	0	1
2115		0	1	0	0	0	1	0	0	0
2121		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2122		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2123		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2124		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2131		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2132		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2133		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2134		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2135		0	1	0	1	0	1	0	1	0
2211		0	0	0	0	1	1	0	0	1

























В. 3 Фрагмент графа G4 "Формообразующие – контрольные калибры"

Код калибра	<i>j</i>	1111	1112	1113	1121	1122	1123	1131	1132	1133
<i>i</i>	При мер калибра									
1114		1	1	1	0	0	0	1	1	1
1115		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1124		1	1	1	1	1	1	1	1	1
1125		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1214		1	1	1	0	0	0	1	1	1
1215		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1224		1	1	1	1	1	1	1	1	1
1225		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1311		1	1	1	0	0	0	1	1	1
1312		1	1	1	0	0	0	1	1	1
1315		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1321		1	1	1	1	1	1	1	1	1
1322		1	1	1	1	1	1	1	1	1
1325		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1332		0	0	0	0	0	0	1	1	1

В. 5 Фрагмент графа G6 "Контрольные – чистовые калибры"

Код калибра	<i>j</i>	1134	1135	1234	1235	1331	1335	3134	3135	3234
<i>i</i>	При мер калибра									
1111		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1112		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1113		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1121		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1122		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1123		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1131		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1132		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1133		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1211		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1212		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1221		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1222		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1231		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1232		1	1	1	1	0	0	0	0	0

В. 6 Фрагмент графа G7 "Формообразующие – чистовые калибры"

Код калибра	<i>j</i>	1134	1135	1234	1235	1331	1335	3134	3135	3234
<i>i</i>	При мер калибра									
1114		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1115		0	1	0	0	0	0	0	0	0
1124		1	1	0	0	0	0	0	0	0
1125		0	1	0	0	0	0	0	0	0
1214		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1215		0	1	0	1	0	0	0	0	0
1224		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1225		0	1	0	1	0	0	0	0	0
1311		1	1	1	1	1	1	0	0	0
1312		1	1	1	1	1	1	0	0	0
1315		0	1	0	1	0	1	0	0	0
1321		1	1	1	1	1	1	0	0	0
1322		1	1	1	1	1	1	0	0	0
1325		0	1	0	1	0	1	0	0	0
1332		1	1	1	1	1	1	0	0	0

В. 7 Фрагмент графа G8 "Чистовые – чистовые калибры"

Код калибра	<i>j</i>	1134	1135	1234	1235	1331	1335	3134	3135	3234
<i>i</i>	При мер калибра									
1135		0	1	0	0	0	0	0	0	0
1234		1	1	1	1	0	0	0	0	0
1235		0	1	0	1	0	0	0	0	0
1331		1	1	1	1	1	1	0	0	0
1335		0	1	0	1	0	1	0	0	0
3134		1	1	0	0	0	0	1	1	0
3135		0	1	0	0	0	0	0	1	0
3234		1	1	1	1	0	0	1	1	1
3235		0	1	0	1	0	0	0	1	0
3331		1	1	1	1	1	1	1	1	1
3335		0	1	0	1	0	1	0	1	0
4134		1	1	0	0	0	0	0	0	0
4135		0	1	0	0	0	0	0	0	0
4234		1	1	1	1	0	0	0	0	0
4235		0	1	0	1	0	0	0	0	0

Приложение Г

Монтажные схемы прокатных валков для швеллера 24У при прокатке в калибрах с увеличенным уклоном полок (заводская калибровка) на РБС ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

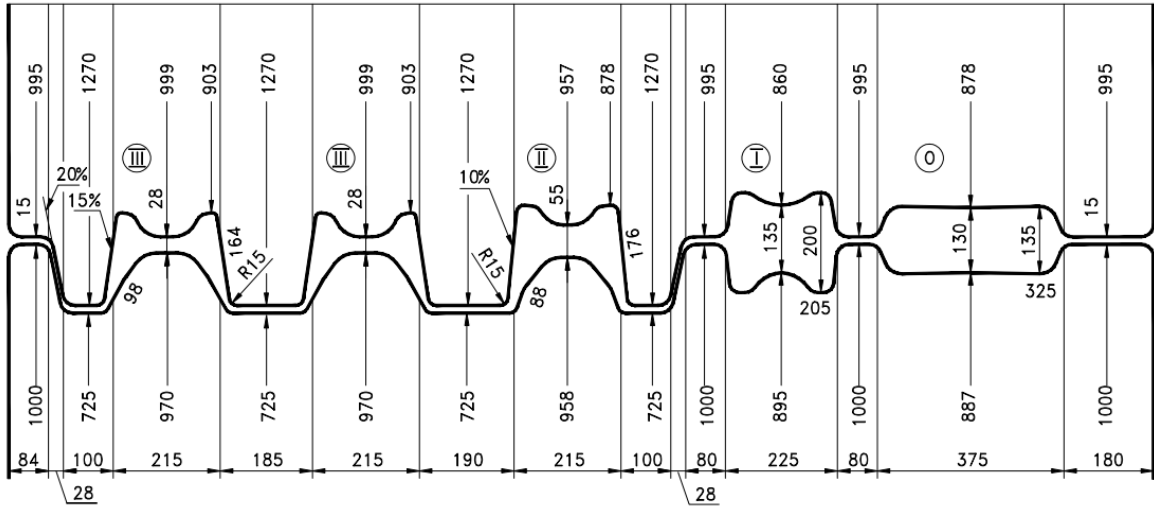


Рисунок Г.1 – Монтажная схема калибров стана 950 для швеллера 24У

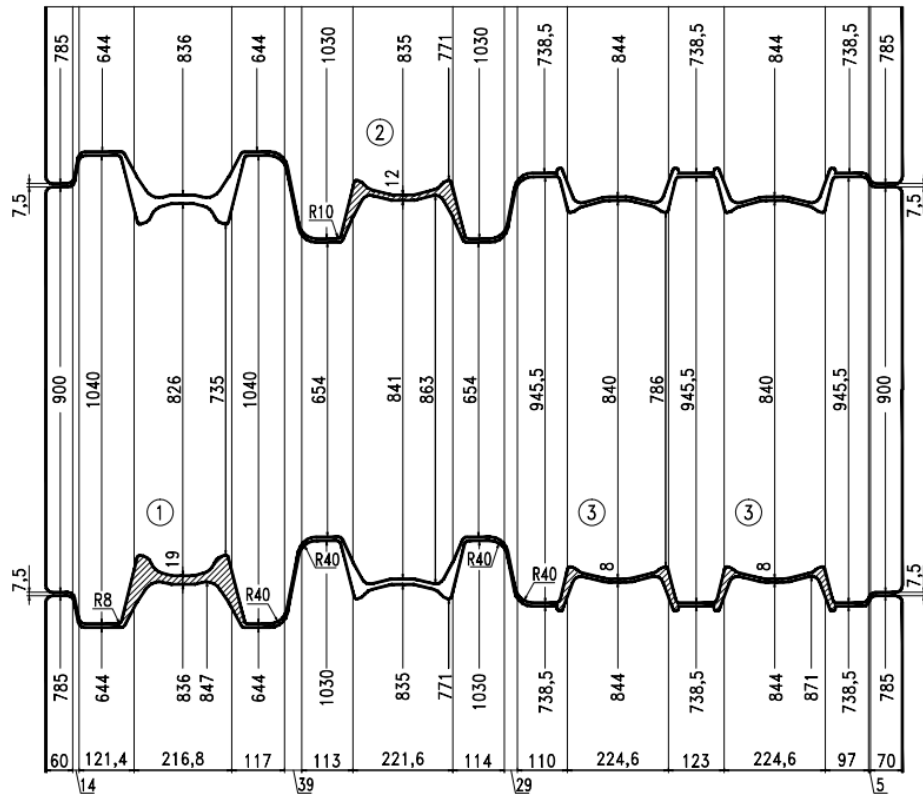


Рисунок Г. 2 – Монтажная схема калибров черновой (1) клетки стана 800 для швеллера 24У

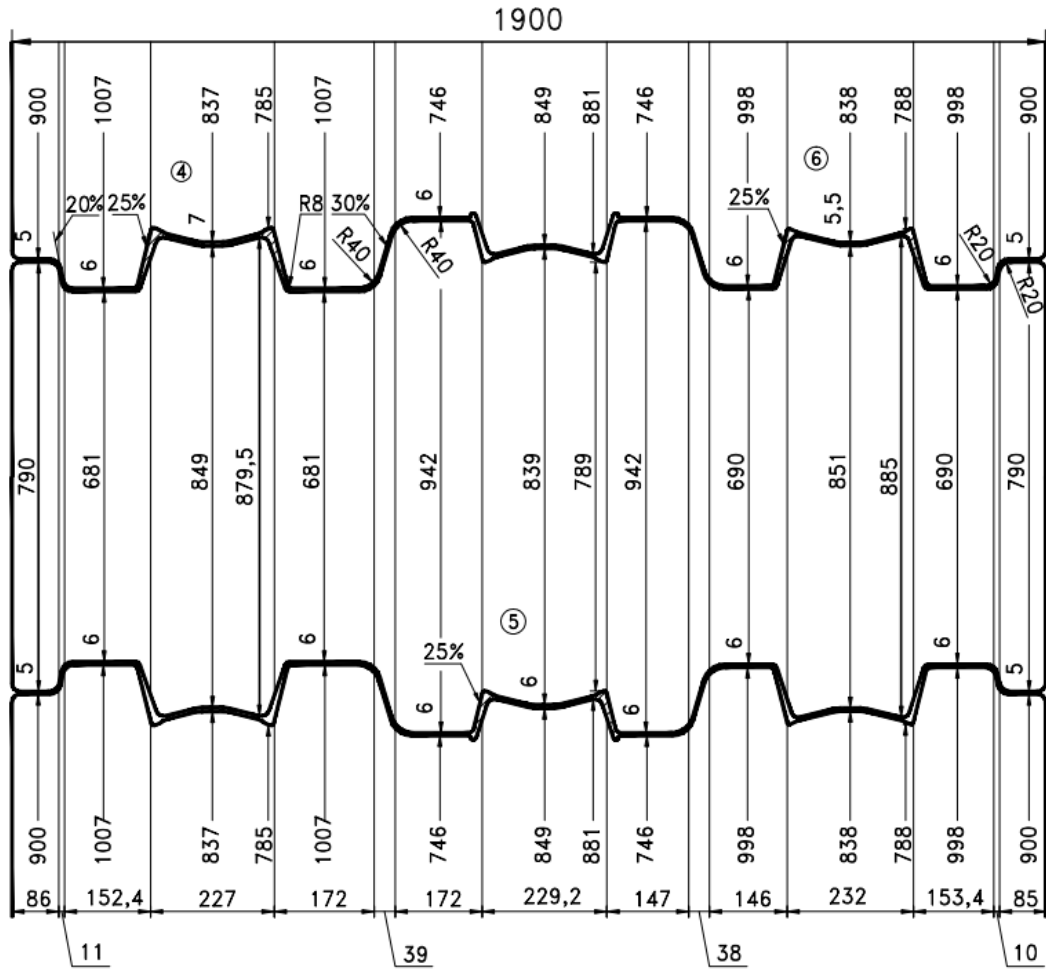


Рисунок Г. 3 – Монтажная схема калибров предчистовой (2) клетки стана 800 для швеллера 24У

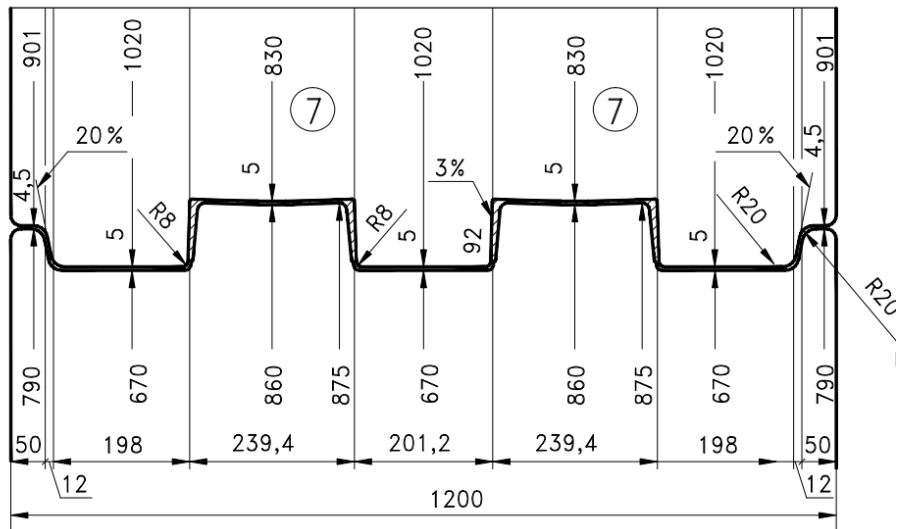


Рисунок Г. 4 – Монтажная схема калибров чистовой (3) клетки стана 800 для швеллера 24У

Приложение Д

Оптимальная развернутая калибровка валков для прокатки швеллера №24У
на РБС ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

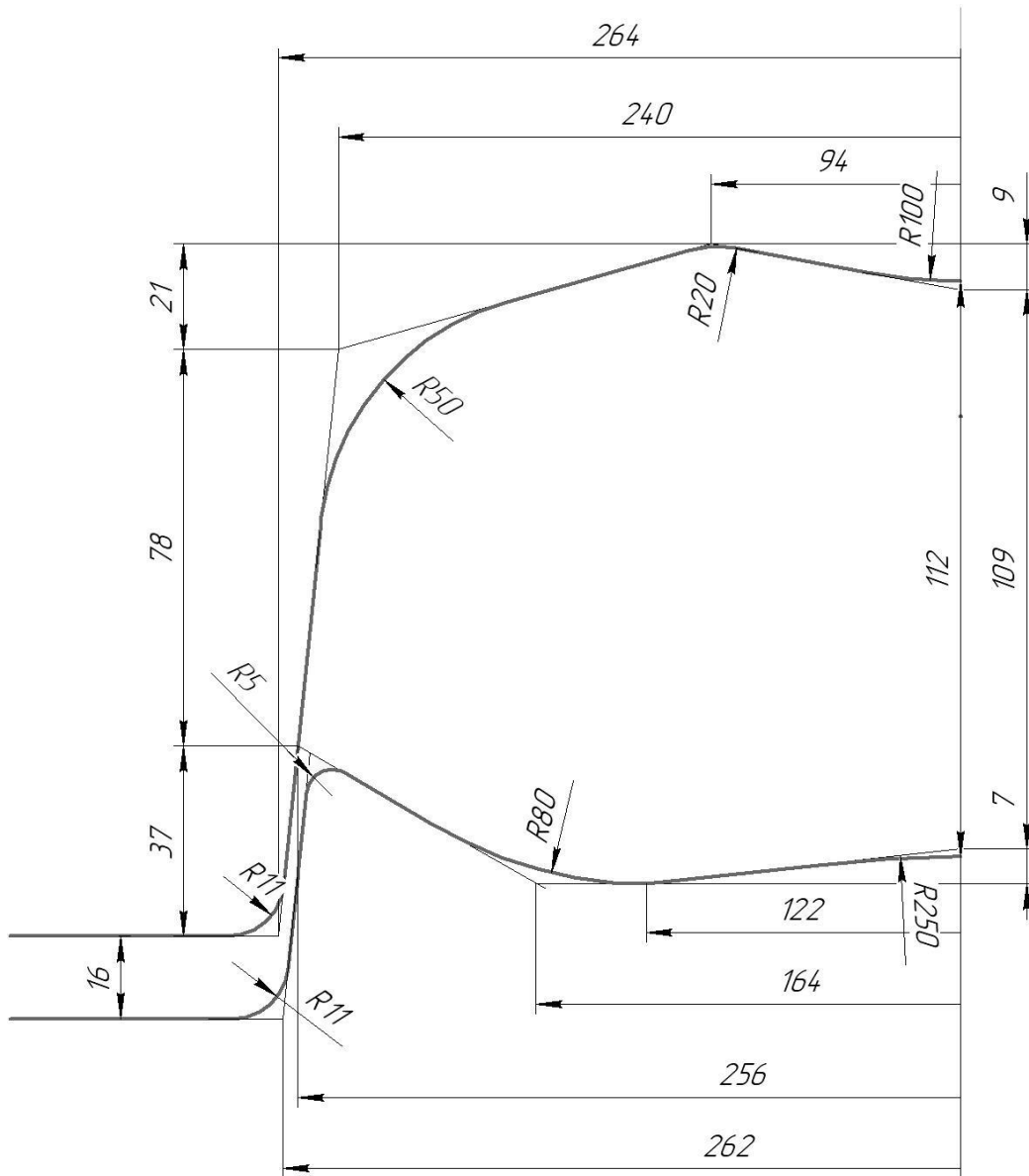
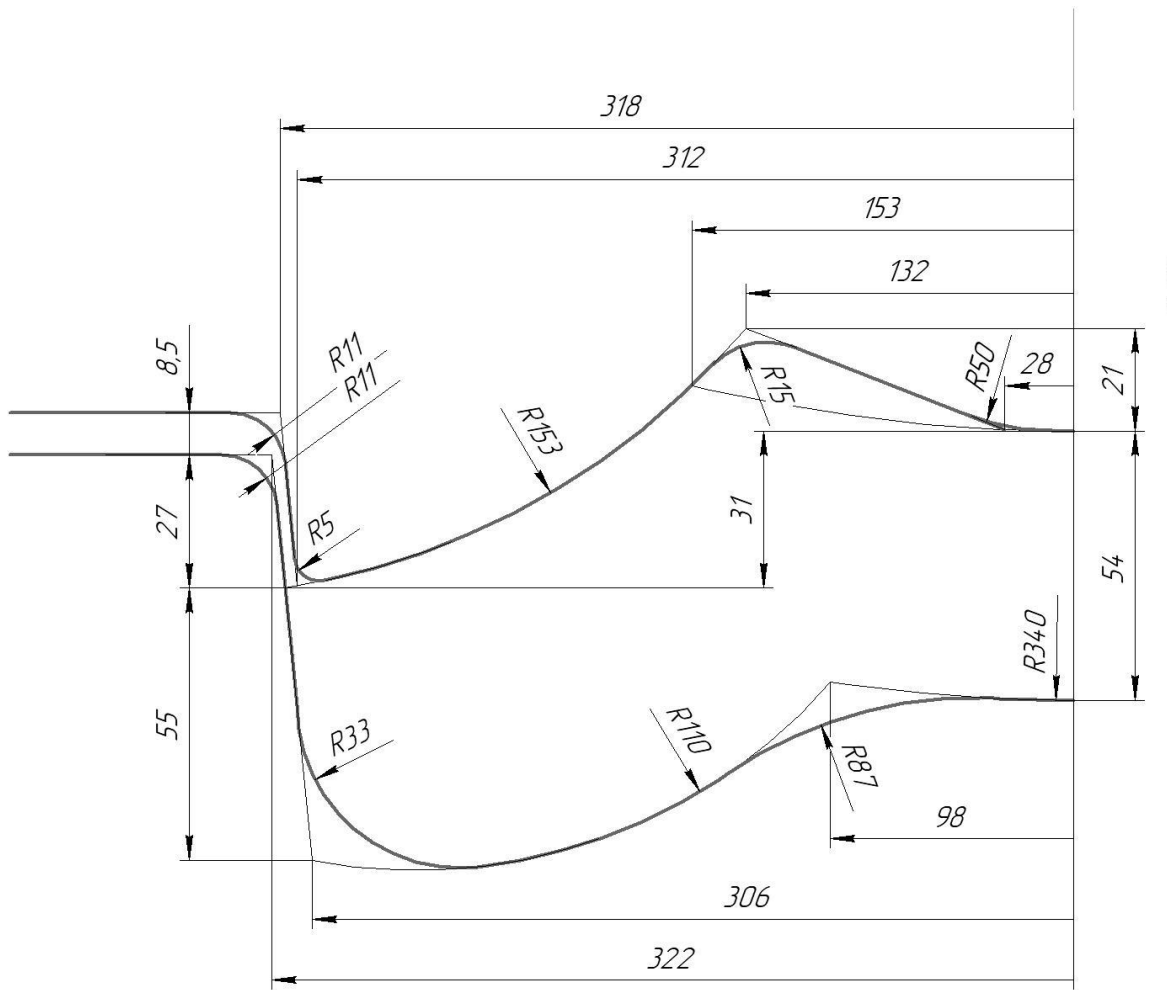


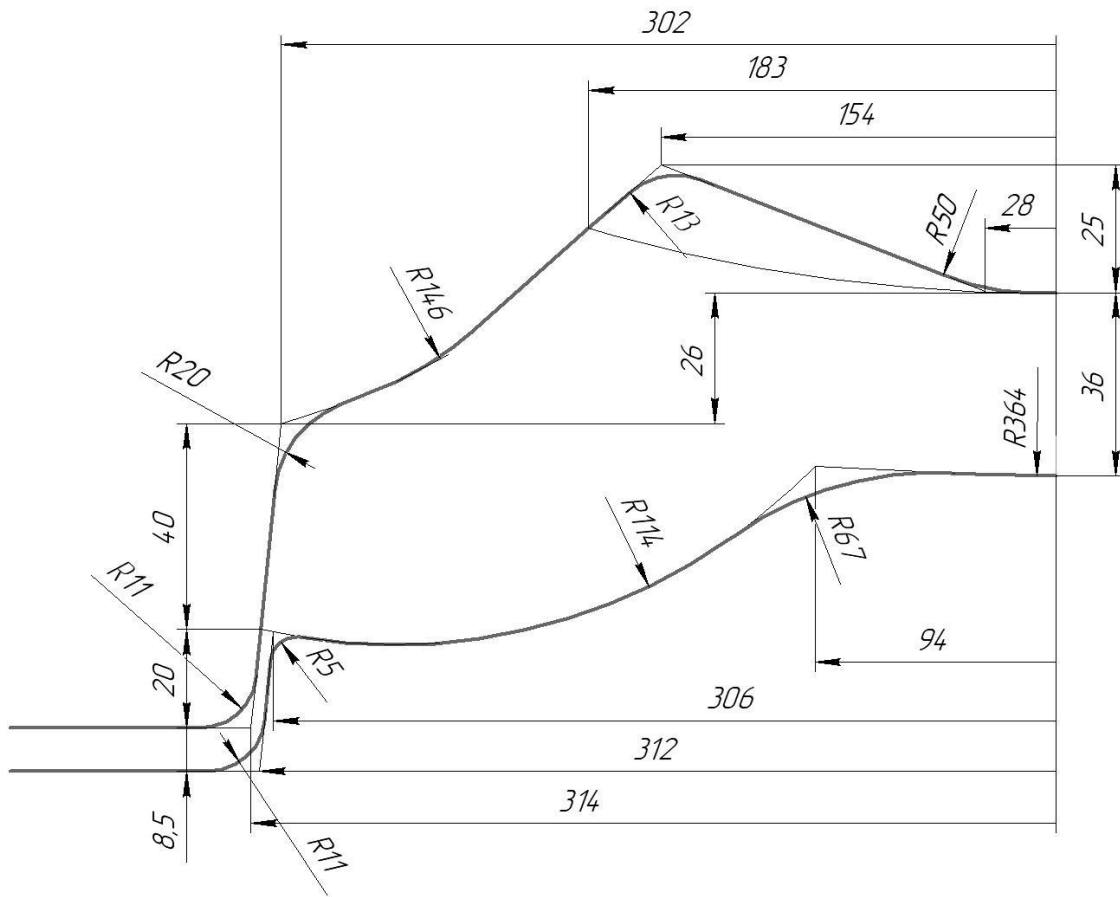
Рисунок Д.1 – Чертеж разрезного калибра



1

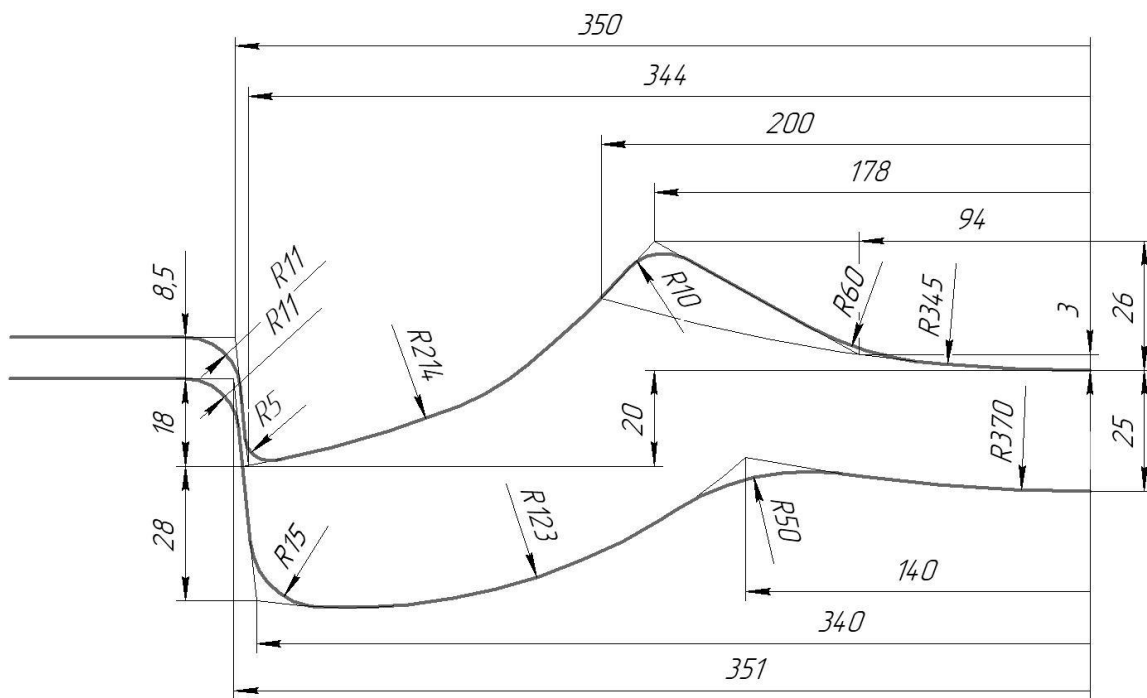
Рисунок Д.2 – Чертеж калибра №1

205



2

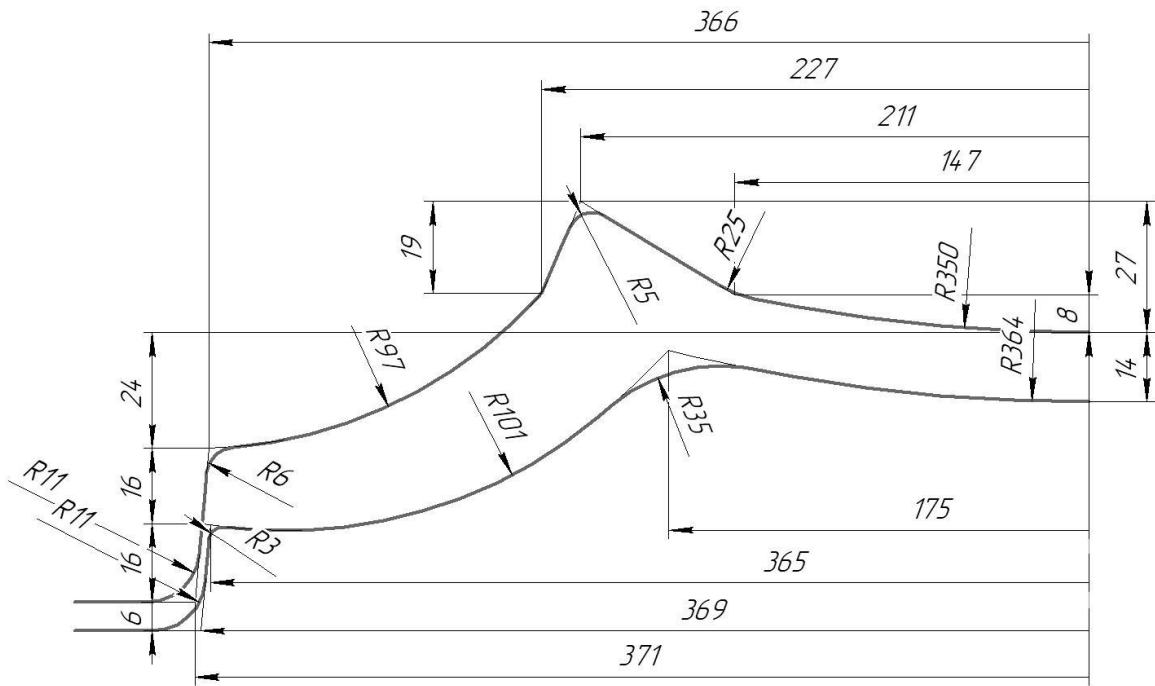
Рисунок Д.3 – Чертеж калибра №2



3

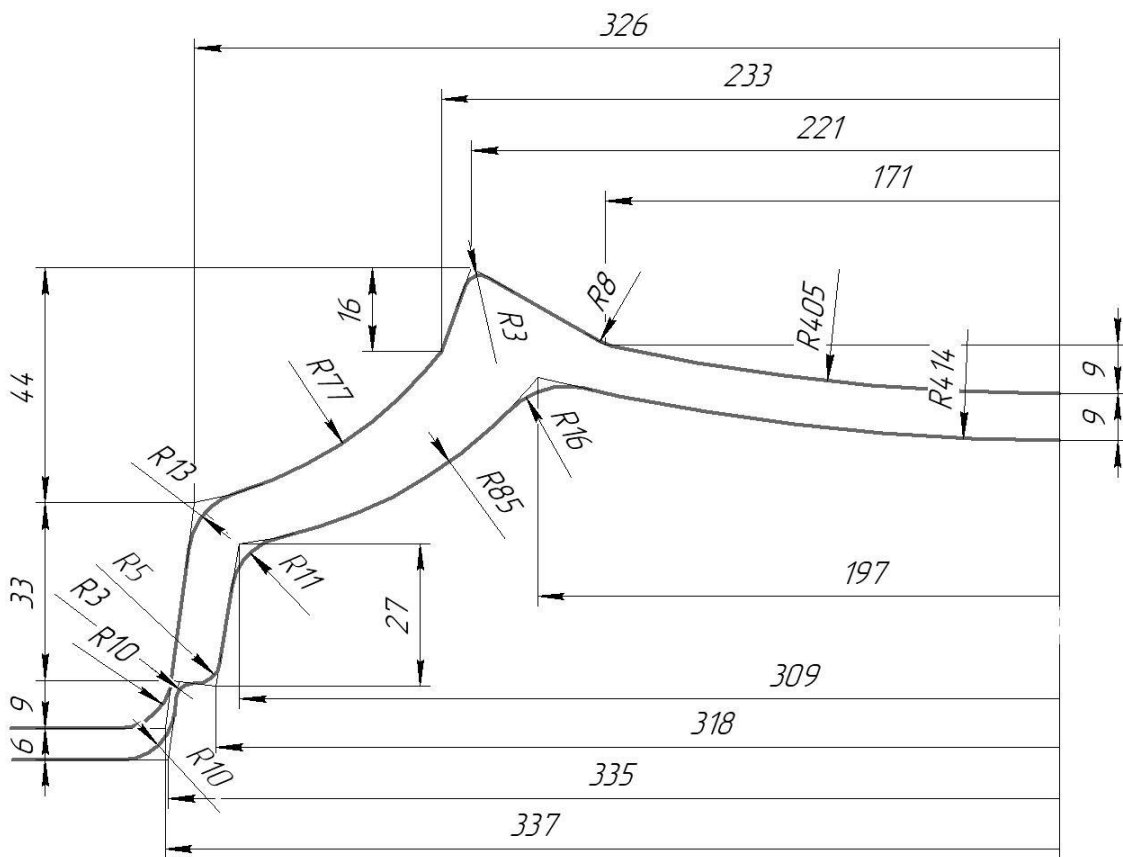
Рисунок Д.4 – Чертеж калибра №3

206



4

Рисунок Д.5 – Чертеж калибра №4



5

Рисунок Д.6 – Чертеж калибра №5

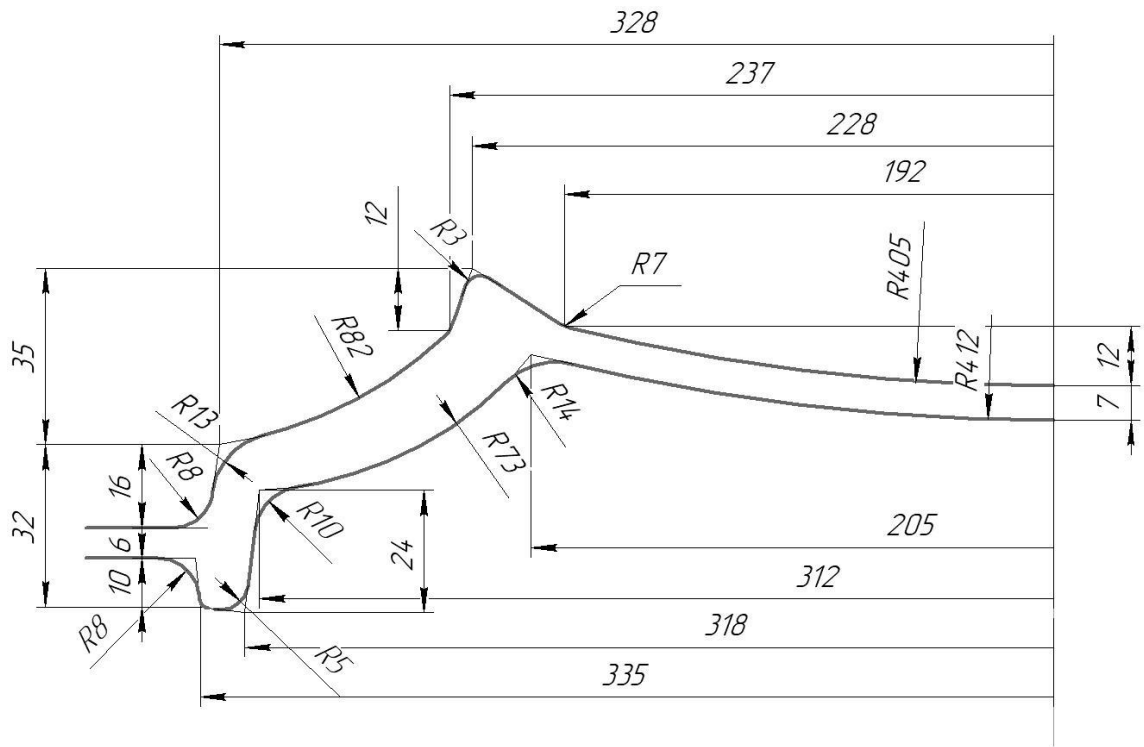


Рисунок Д.7 – Чертеж калибра №6 (контрольный)

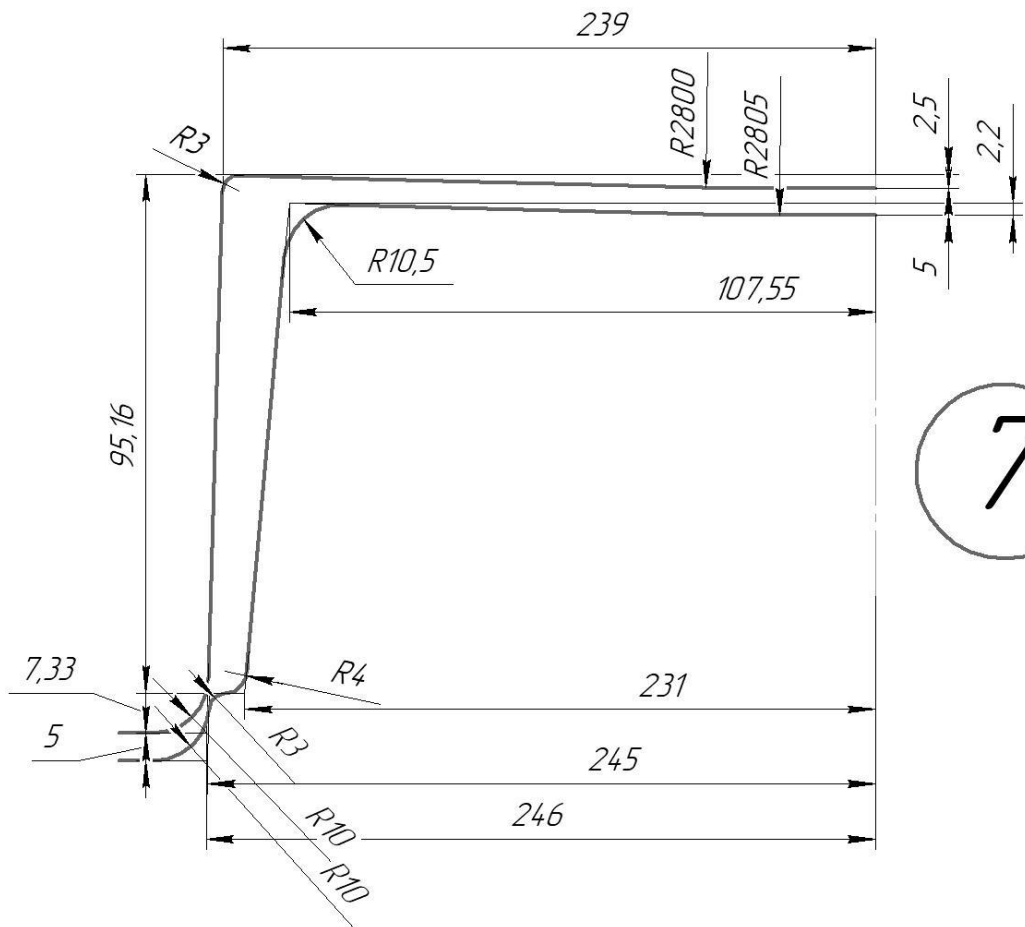


Рисунок Д.8 – Чертеж калибра №7 (чистойой)

Приложение Е

Монтажные схемы прокатных валков для швеллера 24У при прокатке в развернутых калибрах (оптимальная калибровка)

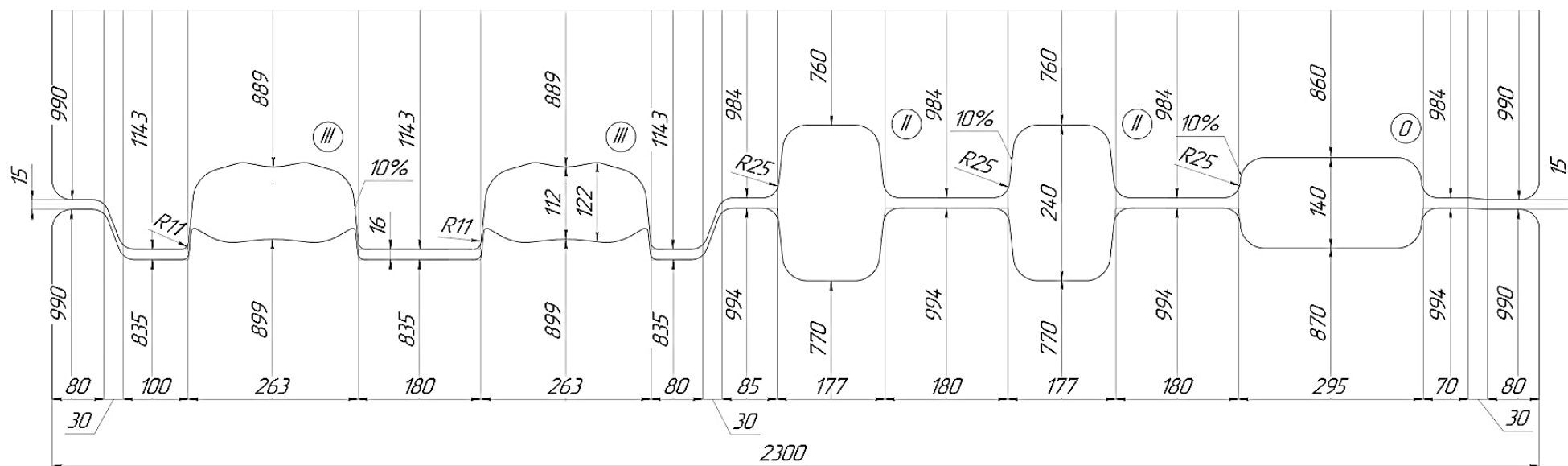


Рисунок Е.1 – Монтажная схема калибров стана 950 для швеллера 24У

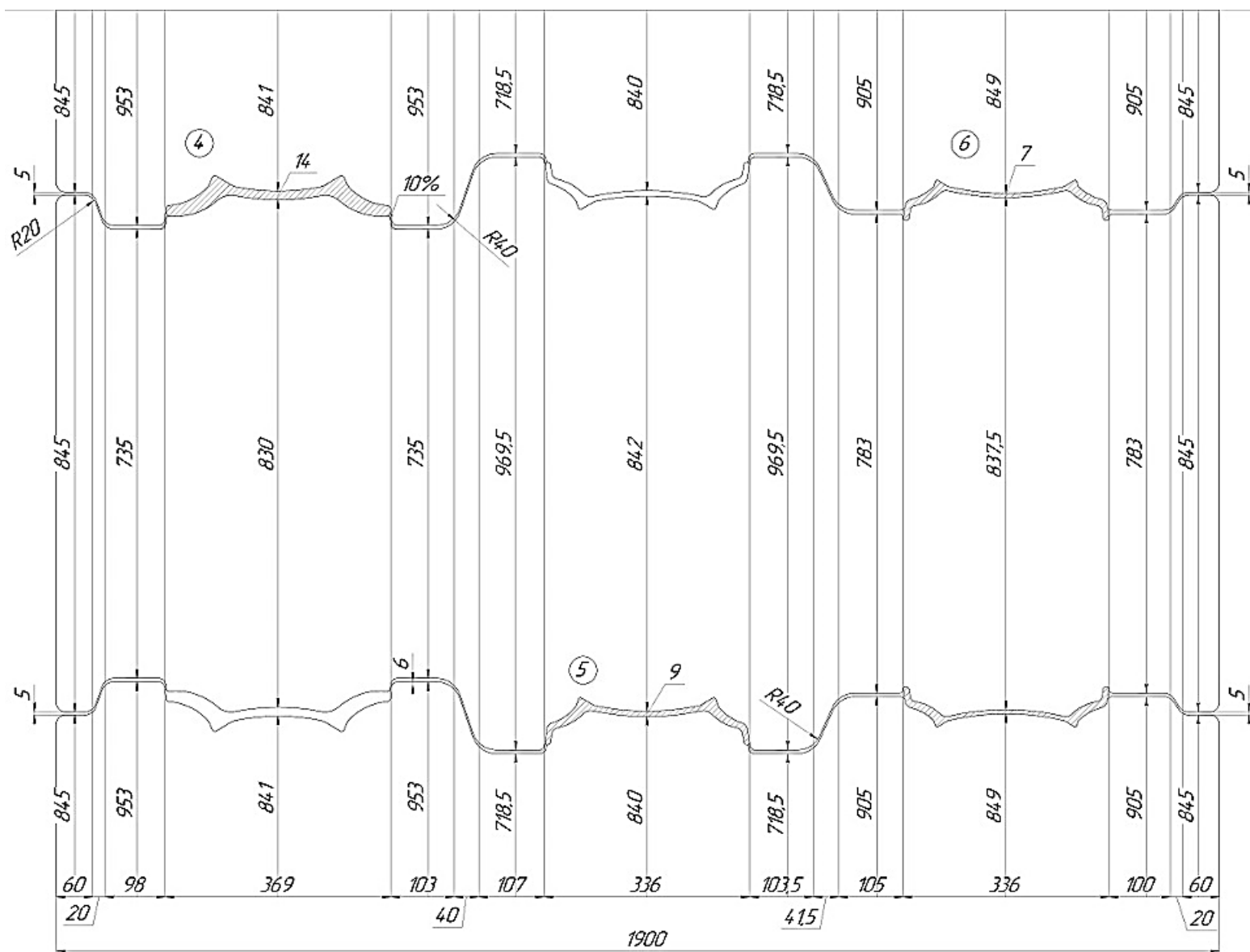


Рисунок Е. 3 – Монтажная схема калибров предчистовой (II) клетки стана 800 для швеллера 24У

Приложение Ж

Акт об использовании результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ЕВРАЗ НТМК
Д. А. Кошкарров

« 19 » апр 2023



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
аспиранта кафедры «Обработка металлов давлением»
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Салихьяновой Екатерины Ильиничны

Материалы диссертационной работы «Разработка математической модели проектирования и оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров», в частности, общая математическая модель оптимизации и проектирования оптимальной калибровки сортопрокатных валков, математическая модель проектирования и оптимизации швеллерной калибровки, конструктивная модель процесса прокатки швеллеров доложены на научно-техническом совещании представителей службы прокатного производства, рельсобалочного цеха и технического управления АО «ЕВРАЗ НТМК».

С применением указанных моделей разработана оптимальная калибровка валков для прокатки швеллера №24У на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ НТМК». Калибровка передана для последующего освоения и внедрения.

Разработанная методика проектирования и оптимизации передана АО «ЕВРАЗ НТМК».

Начальник прокатного производства	К.А. Улегин
Заместитель начальника РБЦ по технологии	С.А. Роцупкин
Старший калибровщик РБЦ	П.А. Алыпов
Старший калибровщик ЦПШБ	О.В. Килишевский
Главный специалист ПП по прокатным валкам	А.Н. Бородин
Начальник бюро производства КСЦ ТУ	И.К. Галимьянов
Главный специалист ТУ по производству рельсов, к.т.н.	В.Ю. Рубцов