

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН**

**КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**А.Б. Найзабеков, В.А. Талмазан, О.Н. Кривцова, С.Н. Лежнев,
Г.А. Сивякова, Е.А. Панин**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ НА
ЛИСТОВЫХ СТАНАХ**

Темиртау, 2014

УДК 621.771
ББК 30.121
М73

Рецензенты:

Мазур И.П. – доктор технических наук, профессор Липецкого государственного технического университета;
Исагулов А.З. – доктор технических наук, профессор Карагандинского государственного технического университета;
Быхин Б.Б. - кандидат технических наук, доцент Карагандинского государственного индустриального университета.

А.Б. Найзабеков, В.А. Талмазан, О.Н. Кривцова, С.Н. Лежнев, Г.А. Сивякова, Е.А. Панин

Моделирование свойств металла при прокатке на листовых станах: Монография. – Темиртау: КГИУ, 2014. – 273 с.

ISBN 978-601-7369-10-1

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с технологией производства на АО «АрселорМиттал Темиртау» непрерывнолитых слябов, горяче- и холоднокатаных листов; анализом показателей пластичности; теорией прочности; исследованием свойств слябов, листов; условиями деформирования слябов на широкополосном стане 1700; математическим моделированием этого процесса.

Монография может быть полезной для студентов и магистрантов специальностей: «Технология обработки материалов давлением» и «Металлургия».

Рекомендовано к изданию учебно-методической секцией по специальности «Технология обработки материалов давлением» (Протокол №4 от 02.12.2013 года).

УДК 621.771
ББК 30.121
М73

ISBN 978-601-7369-10-1

© МОиН РК
© КГИУ
© Найзабеков А.Б.
© Талмазан В.А.
© Кривцова О.Н.
© Лежнев С.Н.
© Сивякова Г.А.
© Панин Е.А.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Производство листа на АО «АрселорМиттал Темиртау»	8
1.1 Производство непрерывнолитых слябов	8
1.2 Производство горячекатаного листа	13
1.3 Производство холоднокатаного листа	15
1.4 Производство холоднокатаной жести	17
1.5 Производство листов с покрытием	20
2. Пластичность. Деформируемость. Сопротивление деформации	21
3. Исследование и моделирование свойств непрерывнолитого металла при различных условиях деформирования	31
3.1 Особенности химического состава, структуры и свойств непрерывнолитого металла	31
3.2 Исследование химического состава непрерывнолитых слябов	33
3.3 Оценка качества макроструктуры непрерывнолитых слябов	37
3.4 Исследование свойств горячекатаного листа	40
3.5 Определение свойств холоднокатаного листа	47
4. Определение условий деформирования непрерывнолитого металла, обеспечивающих его максимальную пластичность	53
4.1 Исследование условий деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС 1700	53
4.2 Алгоритм моделирования процесса деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС-1700	59
4.3 Моделирование процесса деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС-1700	66
4.4 Моделирование процесса деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС 1700 в условиях низкотемпературного нагрева	71
5. Исследование характеристик механических свойств горячекатаного металла на НШПС-1700	79
5.1 НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау»	79
5.2 Технология производства горячекатаного металла на НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау»	80
5.3 Методика определения механических свойств горячекатаного листа	83
5.4 Требования стандартов к качеству горячекатаного листа	86
5.5 Исследование механических свойств горячекатаного металла	90
5.6 Квалиметрическая оценка качества горячекатаного листа	97
5.6.1 Методика квалиметрической оценки качества	97
5.6.2 Оценка качества горячекатаного листа марки стали 08Ю	100
5.6.3 Оценка качества горячекатаного листа марки стали S235JR	102
6. Математическое моделирование ресурса пластичности металла при горячей прокатке на НШПС-1700	108

6.1 Алгоритм и программа математического моделирования	108
6.2 Моделирование ресурса пластичности при прокатке на НШПС-1700	130
6.3 Расчет полиномиальных моделей	137
7 Анализ механических свойств холоднокатаного металла, прокатываемого на стане 1700	140
7.1 Стан 1700 холодной прокатки листа	140
7.2 Технология производства холоднокатаного листа на стане 1700	141
7.3 Анализ механических свойств холоднокатаного листа	145
7.4 Квалиметрическая оценка качества холоднокатаного листа	152
8 Математическая модель ресурса пластичности холоднокатаного листа	155
8.1 Особенности холодной прокатки	155
8.2 Алгоритм моделирования ресурса пластичности с учетом дефектов	157
8.3 Блок-схема и программа моделирования ресурса пластичности	163
8.4 Моделирование ресурса пластичности и выкатываемости дефекта при холодной прокатке	170
9 Оптимизация режимов холодной прокатки листа на стане 1700	174
9.1 Общие понятия об оптимизации технологических процессов	174
9.2 Алгоритм оптимизации режимов прокатки по критерию минимума СИРП	176
9.3 Программа оптимизации холодной прокатки листа на стане 1700	178
9.4 Оптимизация режимов холодной прокатки листа на стане 1700	184
9.5 Анализ расчетных данных энергосиловых параметров холодной прокатки листа на стане 1700	188
10 Исследование характеристик механических свойств жести, производимой на стане 1400	193
10.1 Назначение и характеристика жести	193
10.2 Свойства жести и стандарты их регламентирующие	193
10.3 Производство жести на АО «АрселорМиттал Темиртау»	198
10.4 Методы определения характеристик и механических свойств жести	200
10.5 Результаты испытаний механических свойств жести	203
10.5.1 Исследование твердости холоднокатаного проката из стали марок MR1 и MR2	203
10.5.2 Исследование прочностных свойств белой жести	204
10.5.3 Статистическая оценка показателей жести из стали марки 08кп	209
10.6 Квалиметрический анализ качества черной жести	219
11 Математическая модель ресурса пластичности жести, прокатываемой на стане 1400	226
11.1 Особенности холодной прокатки жести	226
11.2 Алгоритм расчета параметров холодной прокатки жести	227
11.3. Программа расчёта параметров холодной прокатки жести	245
11.4 Математическая модель ресурса пластичности при прокатке	250

жести	
12 Оптимизация режимов прокатки жести на стане 1400	259
12.1 Метод оптимизации	259
12.2 Компьютерная программа оптимизации режимов обжатий	261
12.3 Оптимизация режимов прокатки жести на стане 1400	262
Заключение	269
Список использованных источников	270

ВВЕДЕНИЕ

АО «АрселорМиттал Темиртау» (ранее Карагандинский металлургический комбинат) – крупнейшее металлургическое предприятие Республики Казахстан с полным металлургическим циклом производительностью более 5 млн. тонн стали в год. На комбинате эксплуатируется четыре доменные печи. Сталь выплавляется в трех кислородных конвертерах. Конечной продукцией металлургического передела АО «АрселорМиттал Темиртау» является прокат. В составе комплекса прокатных цехов комбината имеются: листопрокатный цех № 1 с широкополосовым станом 1700 горячей прокатки листа; листопрокатный цех № 2 с пятиклетевым непрерывным станом 1700 холодной прокатки листа; листопрокатный цех № 3 с шестиклетевым станом 1400 бесконечной холодной прокатки жести; цех горячего цинкования и алюминирования для покрытия холоднокатаного листа алюмоцинком. Кроме того, имеется сортопрокатный цех со средне-мелкосортным станом 330 для производства сортового металла.

Исходными заготовками для производства листа на комбинате служили катаные слябы, производимые на обжимном стане – слябинге 1150. В связи с пуском в конверторном цехе машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) был осуществлен постепенный переход на непрерывнолитые слябы. В настоящее время непрерывнолитые слябы являются единственным видом исходной заготовки для производства горяче- и холоднокатаного листа.

Использование литых слябов взамен катанных имеет множество преимуществ. Они, в частности, состоят в весьма значительном сокращении производственного цикла и капитальных затрат, улучшении качества заготовок, резком снижении расхода металла. Выход годных слябов при их производстве способом непрерывного литья примерно на 20 % больше для углеродистой спокойной стали и на 10-12 % для кипящей стали по сравнению с прокаткой слитков на слябинге. При непрерывном литье заготовки без остановки машины, получившем название «плавка на плавку», выход годного повышается до 99 % за счет сокращения отходов металла, связанных с остановкой машины. При этом увеличивается производительность разливочной машины (при увеличении машинного времени до 90-95 %). Эффективность непрерывного литья значительна и при производстве легированной стали.

Вместе с тем, с переходом на комбинате на непрерывнолитые слябы в прокатных цехах возникли новые проблемы, связанные с изменением в марочном и профильном сортаменте слябов. Из-за больших размеров слябов возникли перегрузки рабочих клетей и приводов стана 1700 горячей прокатки листа, участились поломки оборудования. Из-за отсутствия достоверных данных о свойствах и пластичности новых марок стали появились затруднения с расчётом технологических параметров при горячей и холодной прокатке, оценкой загрузки механического и электрического

оборудования прокатных станов определением условий деформируемости металла без разрушения, улучшения качества листовой продукции.

С учётом сказанного целью работы ставилось исследование и моделирование свойств непрерывнолитого металла в различных условиях деформирования, с определением условий, обеспечивающих его максимальную пластичность.

В задачи работы входит рассмотрение технологий производства на АО «АрселорМиттал Темиртау» непрерывнолитых слябов, горяче- и холоднокатаных листов, анализ показателей пластичности, теорий прочности, исследование свойств слябов, листов, условий деформирования слябов на широкополосовом стане 1700, математическое моделирование этого процесса.

1 Производство листа на АО “АрселорМиттал Темиртау”

1.1 Производство непрерывнолитых слябов

Для повышения конкурентоспособности продукции АО “АрселорМиттал Темиртау” на существующей площадке кислородно-конвертоного цеха (ККЦ), в условиях действующего «слиточного» производства осуществлен переход на непрерывную разливку стали в слябы.

По подготовленному АО “АрселорМиттал Темиртау” технико-экономическому обоснованию было спроектировано, построено и введено в промышленную эксплуатацию отделение непрерывной разливки стали (ОНРС) в составе: машина для скачивания шлака скребкового типа, две установки ковш-печь и две двухручьевые радиальные машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), изготовленные фирмой «Сименс-ФАИ»

Пробный пуск МНЛЗ был произведен 18 января 2005 г. 2 марта 2005 г. эта машина была введена в промышленную эксплуатацию. В ноябре 2005 г. вступила в эксплуатацию вторая МНЛЗ. Общая производительность машин 5,2 млн т. в год.

Каждая машина состоит из двух ручьев, металлургическая длина каждой машины 29,5 м, радиус изгиба 8000 мм; система ввода затравки сверху; максимальная скорость разливки 2,1 м/мин. МНЛЗ радиального типа условно делится на 4 зоны: вертикальную зону, зону гибки, зону правки и горизонтальную зону. Проектная мощность разливки 5200 тыс. тонн в год.

Освоение технологии производства непрерывнолитых слябов сопровождалось постоянным расширением и усложнением сортамента: от рядовых, для изготовления тонколистового проката, до современных конструкционных, углеродистых, легированных, для получения продукции ответственного назначения: листа для глубокой вытяжки, металла для эмалирования, производства трубных сталей, лонжеронов грузовых автомобилей и т. д.

Существующее оборудование дает возможность производить различные типы слябов не только для переработки внутри комбината, но и на экспорт.

МНЛЗ радиального типа в настоящее время считаются наиболее перспективными. Помимо резкого уменьшения высоты установки (в 2-3 раза и более), они имеют зону вторичного охлаждения увеличенной длины, что позволяет повысить скорость литья. При горизонтальном выходе полосы возможно производство заготовок неограниченной длины, а также совмещение МНЛЗ с прокатными клетями.

В радиальных МНЛЗ по выходе из кристаллизатора сляб движется по дуге с постоянным радиусом. После прохождения нижней точки дуги полностью затвердевший сляб разгибают, переводя его в горизонтальное положение. Большая часть радиальных МНЛЗ предназначена для отливки слябов прямоугольного сечения [1].

МНЛЗ состоит из сталеразливочного и промежуточного ковшей, водоохлаждаемого кристаллизатора, системы вторичного охлаждения, устройства для вытягивания, оборудования для резки и перемещения слитка.

После выпуска металла из сталеплавильного агрегата, доводки по химическому составу и температуре, ковш поднимается литейным краном на поворотный стенд МНЛЗ. После опустошения ковша в позиции разливки, стенд поворачивается на 180° и уже полный ковш находится в позиции разливки. После открытия шибера ковша жидкий металл начинает поступать в промежуточный ковш. Промежуточный ковш является своего рода буфером между сталь-ковшом и кристаллизатором. После открытия стопора из промежуточного ковша металл поступает в кристаллизатор.

Кристаллизатор представляет собой водоохлаждаемую конструкцию, которая совершает вертикальные колебания для предотвращения застывания металла на стенках кристаллизатора. В кристаллизаторе происходит застывание стенок сляба. Далее, под воздействием тянущих роликов сляб попадает в зону вторичного охлаждения (дуговой участок ручья), где на металл через форсунки разбрызгивается вода. После выхода металла на прямолинейный участок ручья, происходит отрезание слябов газовой резка.

В подготовку МНЛЗ к разливке входят следующие операции: выведение из машины конца отливавшегося сляба; проверка стенок кристаллизатора и его положения относительно оси МНЛЗ; проверка форсунок вторичного охлаждения и расстояния между роликами и брусками зоны вторичного охлаждения и тянущих устройств, осмотр прочего оборудования; введение затравки в кристаллизатор и заделка зазора между головкой затравки и кристаллизатором (асбестом или глиной).

Перед началом разливки устанавливают нагретый промежуточный ковш в заданное положение над кристаллизатором, осуществляют подачу воды на кристаллизатор и вторичное охлаждение. Для подвода металла из промежуточного ковша в кристаллизатор применяются погружные стаканы, которые разогреваются газовыми горелками. Промежуточный ковш наполняют металлом на высоту 0,4 – 0,6 м и затем, открывая стопор, начинают подавать металл в кристаллизатор. Длительность заполнения кристаллизатора до начала вытягивания сляба должна обеспечить образование достаточно толстой корки затвердевшего металла и ее прочное сцепление с затравкой; минимальное время наполнения кристаллизатора до рабочего уровня – 40 с. По истечении заданного времени при неполностью заполненном кристаллизаторе, включают механизм вытягивания сляба; одновременно автоматически включается механизм качания кристаллизатора. В течение 1-2 мин скорость вытягивания сляба увеличивают до заданного значения; в дальнейшем ее стараются поддерживать постоянной во избежание образования дефектов в слябе. Технологическая схема производства непрерывнолитых слябов на МНЛЗ ККЦ АО «АрселорМиттал Темиртау» представлена на рисунке 1.1.

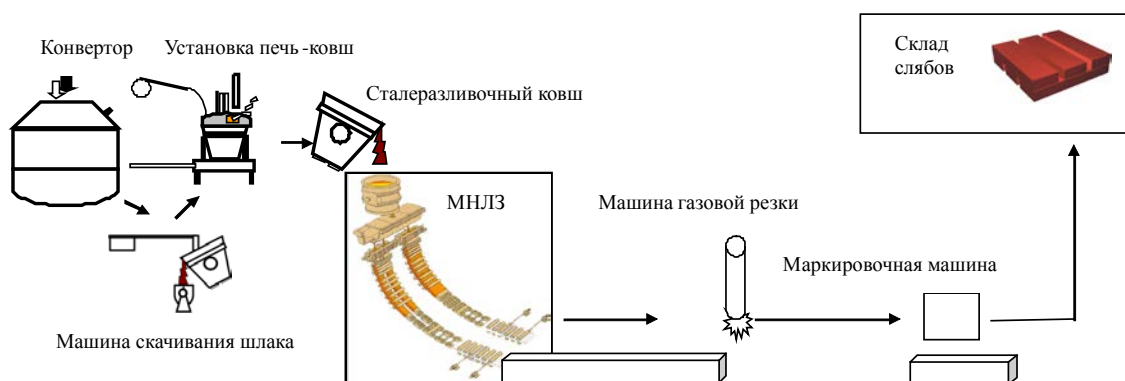


Рисунок 1.1 – Технологическая схема производства непрерывнолитых слябов

Скорость разливки подбирают опытным путем, учитывая, что при ее увеличении возрастает производительность установки, но уменьшается толщина корки сляба на выходе из кристаллизатора и возможен ее прорыв с аварийной остановкой разливки; увеличивается также осевая пористость и пораженность сляба трещинами. Скорость разливки стали зависит от сечения сляба, марки разливаемой стали, состояния оборудования МНЛЗ, обычно понижаясь при увеличении сечения сляба и степени легированности стали.

Рабочие скорости разливки устанавливаются в зависимости от сечения заготовки, группы и марки стали, содержания серы, режима разливки.

Минимальная рабочая скорость разливки при ее стабильности должна быть – 1,0 м/мин. Максимальная скорость разливки определяется в соответствии с толщиной заготовки и маркой стали.

Важным фактором в технологии разливки является режим вторичного охлаждения. Интенсивность вторичного охлаждения зависит от свойств разливаемой стали (склонности к образованию трещин) и от скорости разливки, при росте которой интенсивность подачи воды увеличивают.

Подача воды в первую и вторую зону вторичного охлаждения начинается после наполнения кристаллизатора металлом. Разность температур охлаждающей воды на входе и выходе из кристаллизатора должна быть не более 10 °С. Если разность температур превышает 10 °С, разливка на МНЛЗ должна быть прекращена.

При разливке стали через погружаемые стаканы поверхность металла в кристаллизаторе защищают от охлаждения, окисления и возможного образования заворотов окисленной корки шлаковыми покрытиями. В кристаллизатор вводят шлаковые смеси, которые, соприкасаясь с жидким металлом, расплавляются, образуя слой жидкого шлака. Состав смесей отличается разнообразием, в них могут входить CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaF_2 , MgO , криолит, слюда, цемент, иногда 20 – 30% порошкообразного графита. Смеси должны быть легкоплавкими с температурой плавления 1050 – 1300 °С. Расход шлакообразующей смеси для кристаллизатора должен составлять 500 г/т стали.

В процессе разливки шлакообразующая смесь в кристаллизатор подается небольшими порциями равномерно по всей площади.

Для предотвращения зависания и разрывов корки сляба вследствие ее трения о стенки кристаллизатора последнему сообщают возвратно-поступательное движение. При совместном движении вниз трение отсутствует и корка упрочняется, при подъеме кристаллизатора становятся доступными те участки стенок, которые затем оказываются залитыми жидким металлом.

При подаче металла в кристаллизатор нельзя допускать перерывов струи и резкого изменения количества подаваемого металла. Перерыв струи ведет к образованию спаев (поясов) на слябе. Изменение расхода металла вызывает колебания уровня металла в кристаллизаторе и появление ужимин на поверхности сляба.

После выхода головки затравки из последней пары роликов горизонтального участка производится ее отделение (подрыв) от заготовки, затем ее поднимают вверх и укладывают на МЗЗ (машина заведения затравки). В случае приваривания сляба к головке затравки отделяется только цепь, а головка вместе со слябом передается на стеллажи накопительного участка, где производится отделение головки от сляба.

Перед полным опорожнением ковша наблюдают за процессом выхода стали из ковша. При появлении шлака в струе из под защитной трубы сталеразливочного ковша, шиберное устройство перекрывают, отключают аргон, защитную трубу ковша убирают, ковш поднимают в максимально высокое положение и переводят в резервное положение разливочного стенда. Распределение оставшегося металла из промежуточного ковша по ручьям производится из расчета получения мерных заготовок путем закрытия шиберных затворов сначала на одном, затем на другом ручье.

После прекращения подачи металла в кристаллизатор, промежуточный ковш поднимают и переводят в позицию подогрева, затем передают его на участок ремонта.

Для ускорения затвердевания хвостовой части сляба допускается охлаждение ее водой, допускается его «закупоривание» чугушной стружкой. Остановка ручья при этом допускается не более чем на 5 минут. По мере выведения хвостовой части сляба из машины автоматически отключаются соответствующие зоны вторичного охлаждения.

В процессе разлива слябы на машине газовой резки МНЛЗ разрезают на мерные длины и маркируют (номером плавки, номером ручья, номером сляба). Косые и ступенчатые резы не допускаются, косина реза не должна превышать 15 мм, ступенька реза не более 10 мм со стороны малого радиуса и 15 мм со стороны большого радиуса.

Порезанные слябы отправляются на участок отгрузки. При визуальном обнаружении дефектов поверхности непрерывнолитых слябов, идентификацию их происхождения (причины, класс дефекта) и методы устранения осуществляют в соответствии с классификатором дефектов непрерывнолитых слябов.

Слябы из углеродистых, низколегированных и легированных марок стали, предназначенные для производства горячекатаного проката,

изготавливаются на МНЛЗ согласно стандарту организации СТ АО 38428679 - 2007 «Слябы из углеродистых, низколегированных и легированных марок стали».

Химический состав стали должен соответствовать требованиям ГОСТ 380, ГОСТ 1050, ГОСТ 4543, ГОСТ 5520, ГОСТ 5521, ГОСТ 5781, ГОСТ 9045, ГОСТ 14959, ГОСТ 19281, ГОСТ 21427.2.

По согласованию изготовителя с потребителем допускается поставка слябов с химическим составом стали по другим нормативным документам.

Размеры и предельные отклонения слябов должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Геометрические параметры непрерывнолитых слябов

Показатель	Размеры слябов, мм	Интервал промежуточных размеров, мм	Предельные отклонения
Толщина	180, 200, 220	20	± 2,5 мм
Ширина	от 740 до 1900 включ.*	10	± 0,5 %
Длина:	от 4100 до 12000 включ.	100	± 100 мм
Примечание - * - Слябы шириной от 1560 до 1900 мм изготавливаются по согласованным, изготовителя с потребителем, контрактам.			

При приемочном контроле проверяют геометрические размеры, предельные отклонения от них, отклонения от формы, химический состав стали, качество поверхности, массу слябов, маркировку.

Геометрические размеры слябов, предельные отклонения от них, размеры дефектов поверхности измеряют рулеткой по ГОСТ 7502, штангенциркулем по ГОСТ 166, линейкой металлической по ГОСТ 427, угольником поверочным по ГОСТ 3749, штангенглубиномером по ГОСТ 162. Косину реза и отклонение от плоскостности определяют по ГОСТ 26877. Качество поверхности слябов определяется осмотром. Измерение ширины слябов проводят на расстоянии не менее 50 мм от торцов, а толщины – на расстоянии не менее 50 мм от торцов и 50 мм от боковых кромок. Химический состав стали определяют по ГОСТ 22536.0 - ГОСТ 22536.12, ГОСТ 12344, ГОСТ 12361, ГОСТ 18895 или другими методиками. Массу слябов определяют теоретически (расчетным путем по геометрическим параметрам слябов в холодном состоянии).

За период эксплуатации на АО «АрселорМиттал Темиртау» комплекса непрерывной разливки слябов достигнуто увеличение среднесуточного производства слябов до 12100 т при выходе годного от жидкого 98,0-98,2%, непрерывность разливки от упаковки до упаковки кристаллизатора доведена до 130 плавов.

Разработаны и осуществлены меры по безаварийной работе и исключению неплановых остановок МНЛЗ. Уровень загрузки кристаллизатора составляет

90-92% от календарного времени, количество прорывов корочки металла снижено с 3,6 на 1000 плавков до 1,3 на 1000 плавков, выход годных слябов составляет 99,9-99,95%.

1.2 Производство горячекатаного листа

Горячекатаный лист производится в листопрокатном цехе № 1 (ЛПЦ-1), который введен в эксплуатацию в 1968 году. Цех производит листовую сталь толщиной 2,0-12,0 мм, шириной 900-1520 мм и подкат для станов холодной прокатки толщиной 2,0-4,5 мм, шириной 900-1500 мм. Из непрерывнолитых слябов толщиной 180-220 мм. Проектная производительность цеха 4,5 млн. тонн листового проката в год.

В состав цеха входят:

- 1) отделение нагревательных печей с четырьмя пятизонными методическими рекуперативными печами толкательного типа;
- 2) непрерывный широкополосный стан «1700»;
- 3) адьюстаж, где имеется: два агрегата поперечной резки полос толщиной 2,0-4,0 мм и 3,0-12,0 мм, длиной от 2000 мм до 8000 мм; один агрегат продольной резки полос толщиной 2,0-10 мм, шириной от 120 до 1500 мм; агрегат по производству лонжеронных полос с проходной роликовой нормализационной печью.

Нагревают слябы в четырех нагревательных методических рекуперативных пятизонных с двухсторонним нагревом печах с торцевой загрузкой и выдачей. Каждая печь отапливается смесью коксового и доменного газов калорийностью 6,69 МДж/м³, подаваемой в 60 горелок инжекционного типа. Рабочее давление газа 15,7 кПа, максимальный расход газа на печь 95000 м³/ч. Производительность печи: при горячем посаде 305 т/ч, при холодном 205 т/ч; удельный расход тепла 2,5 МДж/кг.

Стан 1700 состоит из черновой и чистовой групп рабочих клетей и ряда вспомогательных механизмов. Черновая группа: вертикальная клеть, четыре рабочие универсальные четырехвалковые клетки. Чистовая группа: чистовой двухвалковый окалиноломатель и семь четырехвалковых клетей.

Нагретые слябы выдаются из печей на приемный рольганг и прокатываются в клетях черновой и чистовой групп стана. Кромки раската обжимаются в вертикальной клетке и в вертикальных валках универсальных клетей № 2- № 5 для получения необходимых размеров по ширине полосы. Правильное положение раската относительно оси прокатки обеспечивается раздвижными направляющими линейками перед рабочими клетями. Взламывание окалины происходит в вертикальной клетке, черновом и чистовом окалиноломателях. Последующее удаление окалины ведут гидросбивами (г/с) высокого давления за вертикальной клетью (г/с № 1), за черновым окалиноломателем (г/с № 2), за рабочими клетями № 2-№ 4 (г/с № 3 - № 5) и за чистовым окалиноломателем (сдвоенный г/с № 6, № 7). Давление

воды в коллекторах гидросбивов – не менее 9,5-10 мПа при одновременном включении.

Перед чистовой группой клетей установлены летучие ножницы для обрезки переднего и заднего концов подката, для обеспечения нормального продвижения его в чистовой группе клетей. Толщина разрезаемого подката 20-45 мм, ширина 900-1550 мм, скорость движения подката 0,68-2 м/с.

Барабаны ножниц имеют по два ножа, установленных под углом (в плане образуют шевронный рез).

За черновой клетью № 5 установлен реечный сбрасыватель подкатов в аварийных случаях с промежуточного рольганга в карман, где его маркируют, разрезают на мерные длины и складывают в пакеты для последующей отгрузки. Масса сбрасываемого подката до 23 тонн.

Все полосы, прокатанные на стане, сматываются в рулоны на пяти моталках барабанного типа. Толщина сматываемой полосы 1,4-12 мм, ширина 900-1500 мм, температура сматываемой полосы 600-650⁰С, входная скорость полосы в моталку до 8,5 м/с, наибольшее натяжение полосы 20 кН, диаметр рулона 1,1-2,1 м, масса рулона.

Для обеспечения необходимых механических свойств металла полосы перед смоткой в рулоны охлаждаются водой при помощи душирующих установок, расположенных на отводящем рольганге.

Максимальный общий расход воды на душирующей установке 2,08 м³/с, расход воды для охлаждения полосы сверху 1,11 м³/с, для охлаждения снизу 0,98 м³/с, рабочее давление воды для охлаждения полосы сверху 1-3 мН/см², для охлаждения полосы снизу 1-5 мН/см², количество секций охлаждения полосы 12 шт.

Агрегат поперечной резки №1 предназначен для разделки горячекатаной рулонной полосы толщиной от 4 до 12 мм на листы мерной длины и ширины в соответствии с заказом.

Рулоны горячекатаной полосы со склада рулонов подаются к агрегату краном в холодном состоянии (с температурой менее 50⁰С). Резка полос осуществляется летучими ножницами. Скорость порезки полосы 0,5-1,5 м/с,

Агрегат № 2 предназначен для поперечной резки рулонной горячекатаной стальной полосы толщиной 1,2-4 мм на листы шириной 700-1550 мм, длиной 1500-6000 мм.

Предварительно полоса подвергается дрессировке с обжатием 0,5-5%. После дрессировки полоса подается в пятироликую листопрямляющую машину, предназначенную в том числе для создания переднего натяжения при дрессировке. Скорость правки 0,5-2,5 м/с. Выправленная полоса направляется в тянущие ролики перед дисковыми ножницами

Дисковые ножницы предназначены для обрезки боковых кромок полосы с целью получения мерной ширины с последующим измельчением их в кромокорошительных ножницах и уборкой измельченной кромки.

Полоса с обрезанными кромками задается в тянущие ролики перед летучими ножницами и в летучие ножницы. Ножницы предназначены для резки полосы на листы мерной длины 1,5-3,0 м с интервалом 5 мм и 3,0-6,0 м

с интервалом 10 мм. Толщина разрезаемой полосы 1,2-4 мм, ширина 0,7-1,55 м, скорость движения полосы 1,25-2,5 м/с.

С летучих ножниц листы визуального осмотра передают на правильную машину. Скорость правки составляет 1,5-3,5 м/с.

Разрезанные листы листоукладчиками собирают в пакеты, маркируют и отводящим ролянгом передают на весы и склад готовой продукции.

1.3 Производство холоднокатаного листа

Холоднокатаный лист производится в листопрокатном цехе №2 (ЛПЦ – 2). В цехе производится холоднокатаный лист толщиной 0,4-2 мм, шириной 700-1500 мм, без покрытия, в листах и рулонах из углеродистой и низколегированной стали. Объём производства 1300 тыс. тонн в год.

Товарная продукция ЛПЦ-2 – тонколистовая сталь для изготовления кузовов и кабин автомобилей, холодильников, электрошкафов, остовов теле- и радиоаппаратуры, шанцевого инструмента, труб, всевозможных штампованных деталей. Коррозионностойкие стали применяют для изделий, работающих в агрессивных средах, из электротехнических сталей изготавливают детали электродвигателей. Прокат удовлетворяет повышенным требованиям к штампуемости, свариваемости и качеству отделки поверхности листа, пригоден для нанесения металлических и неметаллических покрытий (цинкование, эмалирование, лакокрасочные и полимерные покрытия).

Прокатка листа осуществляется на непрерывном пятиклетевом стане 1700. Исходным материалом для производства готовой продукции является горячекатаная полоса (подкат) в рулонах, получаемых из цеха горячей прокатки. Толщина полосы 1,8-6,0 мм, ширина 700-1550 мм. Диаметр поступающих рулонов – 1550-2200 мм (наружный), 850 мм (внутренний), вес до 23 тонн.

Горячекатаные рулоны со склада горячекатаных рулонов передаются в пролёт непрерывно-травильного агрегата (НТА). Перед холодной прокаткой на пятиклетевом стане 1700 горячекатаные рулоны подвергаются травлению в растворе соляной кислоты, с первичной концентрацией 18-20%.

Для обеспечения непрерывности травления в НТА установлена стыкосварочная машина, предназначенная для сварки полос встык. При прохождении через травильный агрегат производится обрезка боковых кромок и укрупнение веса рулонов до 45 т. В головной части производится разматывание рулона, взламывание окалины, сваривание полос и накопление полосы для бесперебойности работы средней части агрегата.

В средней технологической части производится травление полосы с целью полного удаления окалины с её поверхности в растворе соляной кислоты концентрацией 5-20% и температурой 95⁰С. Травильная ванна разделена на 5 секций длиной по 25 м каждая. Расположение секций ванны

каскадное, с переливом кислотного раствора навстречу движению полосы. Поддержание однородности раствора осуществляется перемешиванием раствора паром, подаваемым в каждую секцию ванны. В процессе травления в травильном растворе образуется хлористое железо, допустимое содержание которого должно быть 15-20%.

Травленные горячекатаные рулоны со склада краном подаются на транспортер загрузочного устройства пятиклетьевого стана 1700, затем перемещаются к разматывателю, вращением которого полоса подаётся правильно-натяжной машине и дальше до захвата её конца валками клетки №1. Прокатка производится в пяти клетях при скорости выхода из клетки №5 до 25 м/с.

В качестве технологической смазки применяется эмульсия. При прокатке полосы толщиной 0,4-0,8 мм используется технологическая смазка типа пальмового масла.

После последнего пропуска, перед сматыванием производится очистка поверхности от сгоревшей смазки и грязи путем подачи на полосу специального раствора. Осуществляется автоматическое регулирование толщины полосы в процессе прокатки.

С барабана моталки полоса, свернутая в рулон, сталкивается на сниматель рулонов и укладывается на транспортер уборочного устройства. Затем взвешивается и обвязывается на специальных механизмах. После обвязки рулоны подаются для последующего отжига в колпаковых печах. Часть рулонов автопогрузчиками передается на агрегат горячего оцинкования.

Со склада рулоны подаются на одностопные колпаковые отжигательные печи, где подвергаются светлomu рекристаллизационному отжигу. Температура отжига 680°C - 720°C , конечная температура светлого охлаждения под муфелем 120°C – для качественного и 140°C - 160°C – рядового металла.

Отжиг производится в атмосфере защитного газа (96 % азота и 4 % водорода). Общее время отжига по проекту 105-150 часов. Время нагрева 10-22 часа, выдержки 24-36 часов, время охлаждения под муфелем – 60 -85 часов.

После распаковки рулоны устанавливаются на участке принудительного охлаждения, где в течение 40-70 часов охлаждаются. Цикл отжига с охлаждением составляет 145-220 часов. Тепловой режим печей автоматизирован.

Отожженные холоднокатаные рулоны краном подаются на транспортер перед дрессировочным станом.

В зависимости от толщины полоса подается или непосредственно в рабочие валки дрессировочной клетки (толщина 1,0-3,5 мм) или же в ролики натяжного устройства (толщина 0,4-1,0 мм). Дрессировка осуществляется при небольших обжатиях (до 3 %), с натяжением, при скорости до 25 м/с. После прохождения дрессировочной клетки конец полосы заправляется на барабан моталки, сматывается в рулон, передается на транспортер, на

котором обвязывается механизированным способом и далее, в зависимости от назначения, передаются на агрегат покрытий или на агрегат резки и упаковки.

Дрессированные рулоны, предназначенные для порезки на листы поступают агрегаты поперечной резки № 1 и № 2, где полоса правится, обрезаются её боковые кромки, разрезается на листы заданной длины, которые промасливаются и укладываются в пакеты.

В потоке производится автоматическая сортировка листов по толщине.

Пакеты убираются на склад готовой продукции для отгрузки потребителям. Партии металла, предназначенные для отгрузки в рулонах, с дрессировочного стана поступают на агрегаты продольной резки № 11 и № 21, где в зависимости от заказа производится или обрезка боковых кромок, или роспуск на более узкие ленты с последующим промасливанием и сматыванием в рулоны. Порезанные рулоны обвязываются по окружности и периметру сечения стальными лентами, упаковываются в водонепроницаемую бумагу и упаковочную ткань с последующей установкой на деревянный поддон. После этого рулоны совместно с поддоном дополнительно обвязываются на механизированных агрегатах и отправляются на склад для отгрузки.

1.4 Производство холоднокатаной жести

Белую (луженую) жечь широко применяют в консервной промышленности и других отраслях народного хозяйства (химической, нефтяной, кондитерской и т. д.) благодаря высокой коррозионной стойкости оловянного покрытия в различных агрессивных средах, а также хорошей штампуемости при изготовлении тары (консервных банок и пр.).

Процесс производства жести и оборудование цеха жести во многом аналогичны процессам производства автолистов и оцинкованных листов. Основное различие заключается в том, что после дрессировки рулоны холоднокатаной полосы поступают на агрегаты лужения (покрытия оловом) плакирования.

Жечь изготавливают из низкоуглеродистой кислой стали (0,07-0,1% С). Наиболее совершенным и производительным способом производства жести является рулонный, позволяющий механизировать и автоматизировать все технологические операции. При этом все технологические агрегаты работают на рулонах, характеризующихся большой массой и большой длиной полосы. Наиболее экономичным является отправка потребителям готовой продукции также в рулонах. Однако отсутствие у потребителей жести (например, на консервных заводах) соответствующего оборудования для резки рулонной полосы вынуждает выполнять эту операцию в цехе жести на металлургическом заводе и отправлять заказчикам готовую продукцию в листах (пачками).

Цех жести АО «АрселорМиттал Темиртау», ЛПЦ-3, предназначен для производства тонкой жести с покрытием оловом (луженая белая жесь), а также черной и полированной жести (без покрытия) и стальных листов кровельной и конструкционной стали; производительность цеха около 750 тыс. т. год.

Исходной заготовкой для холодной прокатки является горячекатаная полоса толщиной 1,8-3 мм, шириной 700-1250 мм в рулонах массой до 30 т; рулоны горячекатаной полосы поступают на склад по межцеховому транспортеру от моталок непрерывного широкополосного стана 1700, расположенного в соседнем цехе.

Цех жести является отделением общего цеха холодной прокатки, в котором имеются:

- непрерывный пятиклетевой четырехвалковый стан 1700 холодной прокатки листа;
- непрерывный шестиклетевой четырехвалковый стан 1400 холодной прокатки.

Рулоны горячекатаной полосы после охлаждения на складе поступают в травильное отделение, в котором имеются два непрерывных травильных агрегата, обслуживающих станы 1700 и 1400. Полоса подвергается травлению в соляной кислоте и сматывается в плотные рулоны «плавающими» моталками барабанного типа.

Холодная прокатка полосы толщиной 1,8-3 мм до толщины 0,1-0,6 мм осуществляется на непрерывном шестиклетевом стане 1400 (длина бочки валков), имеющем рабочие валки диаметром 600-510 мм и опорные диаметром 1400-1320 мм; заправочная скорость прокатки 2 м/с; максимальная при установившемся режиме прокатки 40 м/с; максимальное усилие на валки 20 МН.

На шестиклетевом непрерывном четырехвалковом стане 1400 холодная прокатка может осуществляться двумя способами:

- 1) рулонная прерывистая прокатка горячекатаной полосы (обычная схема);
- 2) непрерывная длительная прокатка горячекатаной полосы при сварке в потоке перед станом концов полос нескольких рулонов (так называемая «бесконечная» прокатка).

Для обеспечения длительной непрерывности («бесконечности») процесса прокатки в головной части стана установлены машина для стыковой электросварки концов полос предыдущего рулона с последующим и петлевой накопитель (аккумулятор) полосы, за счет которого процесс прокатки не прекращается во время сварки концов полос.

В стыкосварочной машине концы полос обрезаются, полосы свариваются встык и сварной шов (грат) зачищается. Далее полоса поступает в подземный петлевой накопитель и при помощи натяжных роликовых устройств направляется в валки первой клетки стана.

По выходе из последней клетки стана непрерывно движущаяся тонкая полоса разрезается летучими ножницами и двумя моталками (поочередно)

смачивается в рулоны требуемой массы. Рулоны снимаются с барабанов моталок снимателями, обвязываются полоской по окружности, взвешиваются на весах и подаются на два цепных транспортера.

При порулонной прокатке концы полос не свариваются между собой в стыкосварочной машине; петлевой накопитель (аккумулятор) полосы и летучие ножницы перед моталками не используются. Рулоны горячекатаной полосы устанавливаются в этом случае на разматыватель перед первой клетью стана. Для обрезки передних концов полосы при порулонной и бесконечной прокатке перед первой клетью стана установлены гильотинные ножницы.

Готовые рулоны направляются в отделение непрерывного отжига или на отдельный агрегат электролитической очистки.

На стане установлены приборы для измерения давления на валки, натяжения полосы, толщины полосы и температуры валков.

Агрегат непрерывного отжига предназначен для светлого отжига полосы жести, имеющей значительный наклеп после прокатки на стане 1400 с обжатием 85-95%. В головной части агрегата имеется установка электролитической очистки (обезжиривания) полосы. Скорость полосы в средней (печной) секции агрегата 5-10 м/с.

При производстве жести для глубокой вытяжки и листов кровельной и конструкционной стали рулоны со стана 1400 подвергаются обезжириванию в двух отдельных агрегатах электролитической очистки и светлomu отжигу в коплаковых печах.

На шестиклетьевом стане 1400 прокатывается жесь толщиной до 0,14-0,76 мм. После отжига жесь подвергается дрессировке на двухклетьевом дрессировочном стане и покрытию (оловом, хромом, алюминием) в агрегатах лужения.

Двухклетьевой дрессировочный стан 1400 имеет рабочие клетки, по конструкции аналогичные клетям шестиклетьевого непрерывного стана 1400. Прокатно-дрессировочный стан аналогичен двухклетьевому дрессировочному стану.

Для получения готовой жести высокого качества (по чистоте и планшетности поверхности, минимальной продольной и поперечной разнотолщинности) предусмотрено:

- 1) профилирование рабочих валков противоизгибом при помощи гидравлических устройств;
- 2) тонкое и грубое регулирование толщины и натяжения полосы при прокатке;
- 3) периодическая подача на опорные валки моющего раствора для недопущения загрязнения полосы при прокатке;
- 4) автоматическое поддержание постоянной температуры валков путем регулирования подачи технологической смазки и охлаждающей воды (в зависимости от скорости прокатки);
- 5) применение разматывателей плавающего типа с барабанами, обеспечивающих прокатку с постоянным натяжением полосы;

- б) исключены операции перематывания рулонов на загрузочных и транспортирующих устройствах, вызывающие порчу их поверхности;
- 7) применение локальных систем автоматизации и ЭВМ.

1.5 Производство листов с покрытием

Производство листов с цинковым, алюмоцинковым и другими покрытиями осуществляется в цехе горячего цинкования и алюминирования (ЦГЦА) В цехе эксплуатируются два агрегата горячего алюмоцинкования (АНГА), цинкования (ЛНГЦ), и линия нанесения полимерных покрытий (ЛНПП).

Проектная мощность агрегата алюмоцинкования 320 тысяч тонн в год, сортамент; алюмоцинковая продукция в плоских и профилированных листах, и в рулонах, толщиной от 0,4 мм до 2,0 мм и шириной от 750 мм до 1450 мм. В эксплуатацию введен в 1998 году.

Проектная мощность второго агрегата цинкования 300 тысяч тонн в год, сортамент: оцинкованная продукция в листах и рулонах, толщина 0,2-1,6 мм, ширина 700-1450 мм. В эксплуатацию введен в 2002 году.

Технология производства проката с алюмоцинковым и цинковым покрытиями включают в себя операции по подготовке полос, нанесение покрытия в ванне с расплавом металла и операции по пассивации поверхности. Возможно производить дрессировку полос с покрытием.

Производственная мощность линии полимерных покрытий - 85 тысяч тонн в год. Продукция – металл с лакокрасочным и полимерным покрытиями, толщиной от 0,25 до 1,6 мм, шириной 650-1370 мм. В эксплуатацию введена в 2006 году.

Технология производства проката с полимерным покрытием включают в себя операции по подготовке полос, нанесение краски (нанесение грунтовочного слоя и слоя основной краски производится роликами в окрасочных камерах) и сушки покрытия в печи.

Продукция поставляется в пачках и рулонах после упаковки и маркировки. Могут производиться профили стальные листовые с трапециевидными гофрами с толщиной основы 0,7-0,9 мм и шириной 750-845 мм.

2 Пластичность. Деформируемость. Сопротивление деформации

Пластичностью называют способность материала деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности [2].

После горячей пластической деформации литого металла структурная неоднородность его уменьшается и повышается его пластичность.

Как правило, пластичность металлов повышается с повышением температуры. Наибольшую пластичность металлы имеют между температурой рекристаллизации T_p и температурой плавления $T_{пл}$. Пластичность с ростом температуры увеличивается не монотонно. Это объясняется тем, что некоторые примеси и легирующие добавки образуют легкоплавкие соединения (эвтектики), которые при некоторых температурах резко уменьшают пластичность. Так, технически чистое железо обнаруживает хрупкость при температурах 900-1000 °С в связи с расплавлением FeS при температуре 985°С, располагающегося по границам зерен (явление краснеломкости) [3].

Когда температура нагрева близка к температуре плавления, пластичность резко снижается из-за перегрева и пережога.

Действие скорости деформации на пластичность при горячей деформации зависит от протекающих одновременно в металле двух процессов: упрочнения (наклепа) и разупрочнения (рекристаллизации). Скорость упрочнения металла определяется скоростью деформации, а скорость разупрочнения – скоростью рекристаллизации, которая зависит от температуры нагрева металла.

С увеличением скорости деформации при холодной обработке давлением в обрабатываемом металле выделяется тепло деформации, которое может вызывать отчасти развитие процесса разупрочнения и, следовательно, повысить пластичность металла.

При обработке давлением большое влияние на пластичность металла оказывает схема напряженного состояния. Положительное влияние на пластичность оказывают сжимающие напряжения, а отрицательное – растягивающие. Проявление пластических свойств металла зависит не только от того, какие напряжения к нему приложены - растягивающие или сжимающие, но и от величины этих напряжений, которая определяется значением среднего (гидростатического) давления:

$$p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}, \quad (2.1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, – главные напряжения.

В зависимости от того, какие по величине и по знаку прикладываются к обрабатываемому материалу напряжения, он может находиться в хрупком или пластическом состоянии. Например, в условиях всестороннего растяжения весьма пластичные материалы, как низкоуглеродистая сталь, переходят в хрупкое состояние. С другой стороны, при всестороннем сжатии

такие хрупкие по своей природе материалы, как песчаник и мрамор, могут обладать пластичностью, т.е. устойчиво изменять свои форму и размеры без разрушения. Некоторые металлы (например, магний и его сплавы, ряд жаропрочных сплавов и др.) успешнее пластически деформируются тогда, когда более ярко проявляется схема всестороннего сжатия. Поэтому на практике при обработке металлов давлением стремятся создать схему, близкую к всестороннему сжатию, которая обеспечивает самую высокую пластичность.

Все металлы и сплавы по возможности деформироваться можно условно разделить на следующие категории:

- а) наивысшей пластичности;
- б) высокой пластичности;
- в) средней пластичности;
- г) пониженной пластичности;
- д) низкой пластичности.

подавляющее большинство применяемых в настоящее время промышленных сталей по своим пластическим свойствам относятся к категории высокой и даже наивысшей пластичности.

К категории средней и высокой пластичности относится большинство легированных сталей. Многие высоколегированные стали и сплавы обладают средней и в ряде случаев пониженной пластичностью.

Количественное влияние химсостава (марки) стали на пластичность определяется по соответствующей диаграмме пластичности. Однако для управления технологическими режимами прокатки важно знать качественное влияние отдельных химических элементов на пластичность и деформируемость металла.

Углерод. Содержание углерода в стали до 0,8 % незначительно уменьшает пластичность металла. Дальнейшее увеличение содержания углерода существенно снижает пластические свойства стали. При содержании углерода 1,5 % и более сталь в литом состоянии часто сначала обрабатывают ковкой, после чего кованую заготовку уже прокатывают.

Марганец. В общем случае марганец повышает пластичность. При повышенном содержании марганца (>12%) пластичность зависит от условий разлива стали. Горячо разлитый металл имеет более низкую пластичность. Металл, разлитый при минимально возможной температуре, имеет мелкозернистую структуру, и пластичность его повышается. Положительное влияние Mn заключается также в том, что он парализует вредное действие серы.

Никель является хорошим поглотителем газов и при наличии в стали водорода способствует уменьшению образования флокенов. Однако он образует сернистые соединения, которые располагаются по границам зерен и способствуют появлению красноломкости стали. Поскольку сульфиды никеля обладают пониженной температурой плавления, то сталь с никелем имеет повышенную склонность к пережогу. Таким образом, пластичность стали с увеличением содержания Ni снижается.

Хром способствует образованию крупнокристаллической структуры, поэтому пластичность стали уменьшается с увеличением содержания хрома.

Ванадий способствует образованию мелкозернистой структуры, и поэтому с ростом содержания ванадия пластичность стали увеличивается.

Вольфрам снижает пластичность стали. Ряд сталей с высоким содержанием вольфрама вначале необходимо обрабатывать ковкой.

Молибден не уменьшает пластичность стали при обычном содержании 0,25-0,3%. Но при содержании молибдена порядка 1,5 % и более сталь становится самозакаливающейся, что приводит иногда к образованию трещин.

Сера – вредная примесь, находится в стали в виде сульфидов железа и марганца. При наличии в стали легирующих элементов (Cr, Ni, W) сера дает их сульфиды, которые также выделяются по границам зерен и, обладая пониженной температурой плавления и прочностью, обуславливают красноломкость стали при пластической обработке в области температур 800-1000 °С. Кроме того, сера создает опасность пережога. Для того чтобы устранить явление красноломкости и повысить пластичность металла, в легированные стали необходимо вводить марганец в соотношении $Mn: S = 6 \div 12$.

Медь. Содержание в стали 0,1 % меди снижает пластичность. Особенно сильно влияние меди в малоуглеродистых сталях. Однако в легированных сталях влияние меди несущественно. Вводя 1 % никеля, можно полностью нейтрализовать вредное влияние меди.

Примеси (олово, сурьма, свинец, мышьяк, фосфор). Все эти элементы за редким исключением являются вредными примесями. Они почти совсем не растворяются в металле и поэтому располагаются по границам зерен, ослабляя связь между ними. Температура плавления этих элементов и их эвтектик очень низкая, вследствие чего при нагреве происходит их расплавление. Это приводит к почти полной потере пластичности.

Газы (водород, азот, кислород) и неметаллические включения при их расположении по границам зерен также снижают пластичность металла.

Приведенные сведения о влиянии химических элементов позволяют получить представление о пластичности прокатываемой стали и с учетом этого назначать режимы обжатий слитков, слябов, заготовок. Кроме того, изменяя содержание в стали тех или иных элементов, можно управлять пластичностью металла.

Величину пластической деформации, накопленной к моменту разрушения, принято измерять степенью деформации сдвига:

$$\Lambda_p = \int_0^{t_p} H d\tau, \quad (2.2)$$

где t_p – время до макроразрушения, $0 < \tau < t_p$;

H – интенсивность скорости деформации сдвига, которая определена вдоль траектории движения частицы.

Λ_p – мера пластичности металла.

При горячей прокатке Λ_p зависит от химсостава металла (марки стали), температуры деформируемой полосы Θ и показателя напряженного состояния

σ/T , где σ – среднее гидростатическое напряжение, T – интенсивность касательных напряжений [2]. Известно также, что при $\sigma/T = \text{const}$ некоторое влияние на пластичность оказывает вид девиатора напряжений или коэффициент Лоде μ_σ , однако зависимость Λ_p от μ_σ при горячей прокатке практически не изучена. Типовой вид диаграммы пластичности, выраженной зависимостью $\Lambda_p = \varphi(\sigma/T, \Theta)$ для каждой марки стали, представлен на рисунке 2.1. С увеличением доли сжимающих напряжений ($\sigma/T < 0$) пластичность металла всегда увеличивается, а повышение доли растягивающих напряжений ($\sigma/T > 0$) приводит к снижению Λ_p .

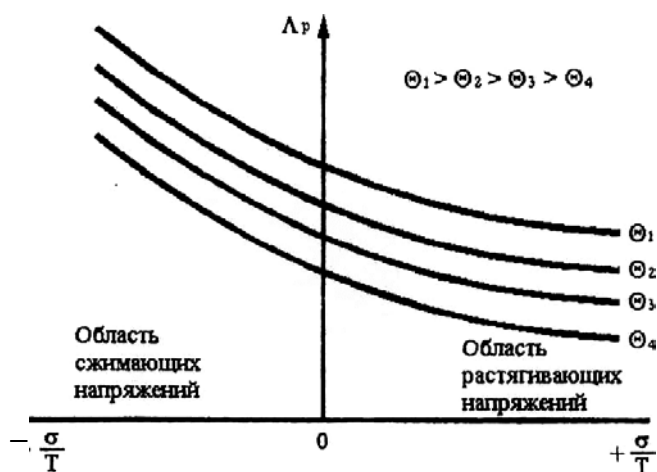


Рисунок 2.1 – Типовая зависимость пластичности от показателя напряженного состояния и температуры металла

С увеличением температуры металла выше температуры рекристаллизации пластичность повышается, так как происходит более интенсивное «залечивание» образующихся при деформации микродефектов диффузионным путем и перекристаллизацией, т.е. более интенсивное восстановление пластичности. Поскольку процесс деформации является весьма быстротечным (продолжительность прохода составляет доли секунды), то восстановление пластичности происходит во время пауз между проходами. Зависимость Λ_p от температуры индивидуальна для различных марок стали и сплавов, но имеется одна общая черта этой зависимости – резкое падение Λ_p при приближении к температуре плавления на 30-70°C (рисунок 2.2), что объясняется оплавлением межзеренных прослоек [3].

Пластичность металла зависит также от скорости деформации. Увеличение скорости деформации снижает пластичность металла, так как при больших скоростях не успевают происходить процессы диффузионного «залечивания» микродефектов и перекристаллизации. Известно, что пластичность зависит и от структуры металла: по мере измельчения зерна величина Λ_p повышается, а крупнозернистая структура приводит к уменьшению пластичности.

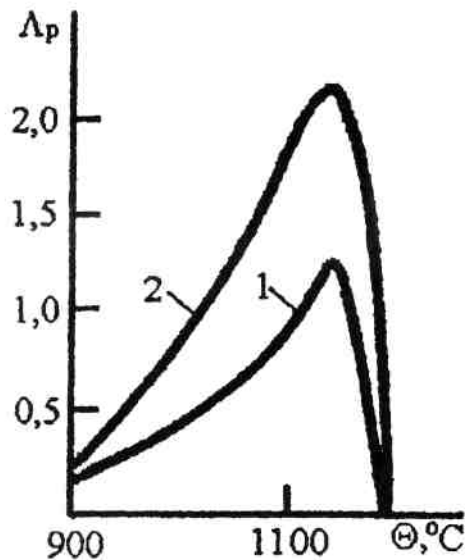


Рисунок 2.2 – Зависимость $\Delta_p - f(\Theta)$ для стали, содержащей 1,5 % С и 2,85 % Сг, при различных режимах нагрева (1 и 2)

За счет создания напряженного состояния всестороннего сжатия, уменьшения скорости деформации до $10^{-4}-10^{-1}$ 1/с и получения сверхмелкого зерна можно получить явление сверхпластичности металла [3].

Для различных технологических процессов обработки металлов широко используются соответствующие показатели пластичности, которые получают при различных методах определения пластичности металлов.

При испытании металла на разрыв характеристиками пластичности служат относительное удлинение и сужение образца в момент разрушения

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% , \quad (2.3)$$

где l_0 – расчетная длина образца;

l - длина образца после разрыва и относительное сужение образца.

Относительное сужение:

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\% , \quad (2.4)$$

где F_0 - площадь поперечного сечения исходного образца;

F – площадь поперечного сечения образца после испытания.

Другим способом определения пластичности металла является "проба на осадку" (или на сжатие), когда пластичность оценивается величиной деформации осаживаемых цилиндрических образцов, при которой начинают появляться трещины на боковой поверхности. Величиной пластичности в этом методе является относительное укорочение:

$$\Delta = \frac{H - h}{H} \cdot 100\% , \quad (2.5)$$

где H – начальная высота образца;
 h – высота образца после сжатия.

Испытание металлов на ударную вязкость является динамическим испытанием пластичности металла. Характеристика ударной вязкости вычисляется по формуле:

$$a_H = A / F, \quad (2.6)$$

где F – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания;

A – работа деформации образца.

Кроме указанных методов, применяют также такие, которые приближаются по условиям деформации к тем или иным технологическим процессам обработки давлением, и в этом случае определяется так называемая "технологическая пластичность". Так, при горячей прокатке пластичность металлов оценивают при помощи клиновидных образцов. В этом случае показателем пластичности является относительное обжатие, соответствующее появлению первой трещины на боковой поверхности образца. При осуществлении процесса холодной прокатки при определении пластичности металла получают значение числа перегибов до разрушения в местегиба и глубины сферической лунки при пробе по Эриксону.

Способность тела в целом изменять свою форму при обработке давлением без макроразрушения называют деформируемостью. Для определения деформируемости металла необходимо проверить возможность его разрушения хотя бы в наиболее опасных местах деформируемого тела. Каждая частица металла в процессе прокатки при движении по линии тока получает некоторую степень деформации:

$$\Lambda = \int_0^t H d\tau, \quad (2.7)$$

где t – продолжительность деформации (например, время прохода),
 $0 < \tau < t$.

До тех пор пока накопленная частицей степень деформации не достигнет предельной величины Λ_p , разрушения металла не произойдет. Таким образом, условие деформирования без разрушения в современной теории записывается в виде:

$$\Lambda < \Lambda_p \quad \text{или} \quad \psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p} < 1. \quad (2.8)$$

Величину ψ называют степенью использования запаса пластичности. Теоретически в момент разрушения $\psi = 1$. Однако, если учитывать историю предварительной обработки металла, эта величина может уменьшаться до 0,7-0,8.

Таким образом, при определении деформируемости металла необходимо для отдельных, характерных частиц прокатываемого тела подсчитать накопленную степень деформации (2.7) при движении по линии тока, затем определить Λ_p и проверить условие (2.8).

Предельную степень деформации Λ_p определяют экспериментальными методами при растяжении круглых образцов с выточкой или при кручении, а также при проведении опытов по осадке цилиндрических образцов или по прокатке на клин образцов, имеющих различное поперечное сечение [2]. Результаты опытов обычно представляют в виде диаграмм пластичности.

При определении деформируемости металла при прокатке с применением положений современной теории разрушения встречаются существенные трудности, связанные, прежде всего, с расчетом степени деформации Λ и показателя напряженного состояния σ/T при прокатке изделий различной формы. Современная теория прокатки не располагает инженерными зависимостями для расчета Λ_p и σ/T по линиям тока при прокатке по различным системам калибров. Кроме того, диаграммы пластичности для определения Λ_p (рисунок 2) построены для ограниченного числа марок стали. Проведение же экспериментальных исследований по определению зависимости $\Lambda_p = \varphi(\sigma/T, 0)$ является достаточно трудоемким и требует много времени.

Поэтому в инженерной практике при расчете режимов прокатки без разрушения используют упрощенную методику, являющуюся частным случаем данной теории разрушения и основанную на определении пластичности методом прокатки на клин. В этом случае в качестве показателя степени деформации вместо Λ используют ее условную характеристику – относительное обжатие $\Delta h/h_0$, где Δh - абсолютное обжатие, h_0 - начальная высота полосы. Для определения предельного (критического) относительного обжатия при котором начинается разрушение, проводят специальные опыты по прокатке образцов квадратного сечения в калибре с переменной глубиной вреза при различной температуре нагрева. Относительное обжатие по длине образца в этом случае плавно изменяется от 0 до 75-85 %. При определенном обжатии на боковой поверхности образца появляется первая трещина. Это относительное обжатие и считается предельно допустимым (критическим) $(\Delta h/h_0)_{кр}$. При дальнейшем повышении обжатия трещины увеличиваются и превращаются в рванины. При испытаниях применяют образцы с литой и деформированной структурой. По результатам опытов строят зависимости $(\Delta h/h_0)_{кр} = f(\Theta)$, которую также называют диаграммой пластичности (рисунок 2.3).

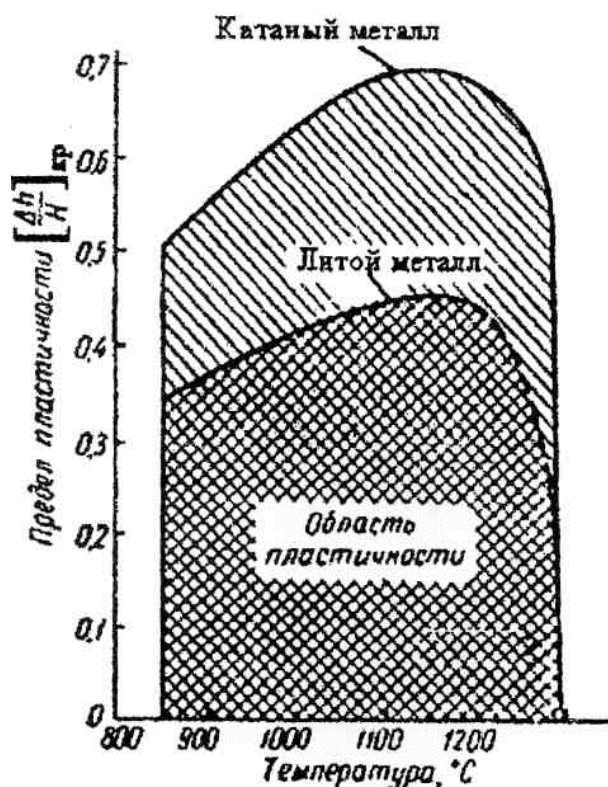


Рисунок 2.3 – Диаграмма пластичности сплава

Заштрихованная часть диаграммы представляет собой область пластичности металла. Линии, ограничивающие эту область для литого и катаного, характеризуют предел пластичности при исследованных температурах горячей обработки. При любом обжатии, лежащем в пределах области пластичности, нарушение сплошности металла при прокатке не происходит. При обжатиях лежащих выше области пластичности, металл при прокатке разрушается. Таким образом, условие деформации без разрушения в данном случае записывается в виде:

$$\Delta h / h_0 < (\Delta h / h_0)_{кр} \cdot \quad (2.9)$$

А отношение $(\Delta h / h_0) / (\Delta h / h_0)_{кр}$ можно по аналогии с ψ считать степенью использования запаса пластичности. Диаграммы такого вида для различных сталей и сплавов приведены в монографии. Пользуясь ими, можно достаточно просто определить возможность деформации металла без разрушения при прокатке по любой схеме. Однако следует иметь в виду, что такая методика не учитывает напряженное состояние металла, а это может приводить к некоторой погрешности при определении пластичности.

Наряду с пластичностью важной технологической характеристикой металлов является сопротивление пластической деформации. Эта характеристика дает количественную оценку податливости обрабатываемого металла и имеет большое значение при назначении технологических режимов прокатки металла, определяя силовые условия процесса. Чем выше сопротивление деформации металла, тем ниже его податливость обработке

давлением и тем труднее его обрабатываемость. Металл, обладающий большим сопротивлением деформации, обрабатывают с меньшими обжатиями и при этом используют большие усилия и более мощное оборудование.

Сопротивление пластической деформации при обработке давлением также зависит от ряда факторов: химического состава металла; температуры, при которой деформируется металл; скорости и степени деформации металла; напряженного состояния деформируемого металла.

В общем виде величину сопротивления пластической деформации можно выразить формулой:

$$P_{CP} = \sigma_{CB} n_{\sigma}, \quad (2.10)$$

где σ_{CB} - сопротивление деформации, характеризующее свойства деформируемого металла,

n_{σ} - коэффициент, учитывающий влияние напряженного состояния.

Величины σ_{CB} и n_{σ} представляют собой произведения коэффициентов, которые соответственно учитывают влияние на сопротивление пластической деформации целого ряда факторов: температуры n_T скорости деформации n_v ; наклепа n_{ε} ; контактного трения $n_{\sigma'}$; внешних зон $n_{\sigma''}$; натяжения $n_{\sigma''}$; предела текучести:

$$\sigma_{CB} = \sigma_T n_T n_v n_{\varepsilon}; \quad (2.11)$$

$$n_{\sigma} = n_{\sigma'} n_{\sigma''} n_{\sigma''}. \quad (2.12)$$

Рассмотрим некоторые из них. Химический состав обрабатываемого металла, его кристаллическая решетка в значительной степени влияют на сопротивление пластической деформации. Тугоплавкие металлы имеют более высокие значения сопротивления пластической деформации, чем легкоплавкие. Как видно из вышеприведенных формул, величина σ_{CB} находится в прямой зависимости от предела текучести σ_T . Как правило, легирующие примеси повышают сопротивление пластической деформации. Температура является наиболее сильно действующим фактором. Понижение сопротивления пластической деформации с повышением температуры часто не имеет плавный характер.

При относительно низких температурах, ниже T_p , существенное влияние на сопротивление пластической деформации оказывает наклеп (упрочнение). При наклепе сопротивление деформации металлов повышается. Это явление наблюдается при холодной прокатке у большинства металлов, за исключением свинца и олова, температура рекристаллизации которых не превышает комнатную температуру.

При горячей обработке металлов влияние наклепа тесно связано с влиянием скорости деформации, т.е. приращением степени деформации за единицу времени. Сущность этого явления заключается в следующем. При деформировании металла протекающая в нем рекристаллизация осуществляется противоположно процессу наклепа. Однако скорость рекристаллизации в большинстве случаев отстает от скорости деформации и, тем самым, не полностью снимается наклеп металла. Следовательно, чем выше скорость деформации, тем меньше полнота протекания рекристаллизации, и тем выше сопротивление пластической деформации.

3 Исследование и моделирование свойств непрерывнолитого металла при различных условиях деформирования

3.1 Особенности химического состава, структуры и свойств непрерывнолитого металла

Сортамент сталей, используемых в настоящее время для отливки слябов, исключительно широк.

Значительное количество разливаемого непрерывным способом на слябовых МНЛЗ металла приходится на долю марганцовистых сталей для прокатки толстого листа. Чаще всего такой толстолистовой прокат используется для изготовления металлических конструкций, строительства судов, сосудов под давлением и труб для магистральных трубопроводов.

Методом непрерывной разливки получают также слябы, предназначенные для производства горяче- и холоднокатаного тонколистового проката из низкоуглеродистой стали.

Тонколистовой прокат широко используют для штамповки. Его делят на металл для умеренной, глубокой и особо глубокой вытяжек, характеризующийся устойчивостью против старения. Такая классификация основана на определенных пределах прочности и структуре зерна стали. Характеристика поверхности листа также определяет его применение. Например, в автомобильной промышленности лист с самым высоким качеством поверхности используют для изготовления деталей кузовов.

Другими областями его широкого применения являются производства белой, безоловянистой жести и оцинкованного тонкого листа.

Эти виды продукции также должны обладать повышенной штампуемостью и высоким качеством поверхности.

Имеются возможности широкого применения непрерывной разливки в производстве толстолистового проката из нержавеющей (аустенитной) стали, тонколистового проката из нержавеющей сталей (аустенитных, ферритных, мартенситных), кремнистой стали для электротехнического тонколистового проката, улучшаемых сталей (закаленных и отпущенных), цементируемых, пружинных сталей и сталей, устойчивых против атмосферной коррозии.

В слитках непрерывной разливки, как и в слитках обычной разливки в изложницы, различают три основные зоны кристаллизации: поверхностную с мелкой дендритной структурой, зону со столбчатыми ориентированными дендритами и центральную зону неориентированных дендритов. Под влиянием различных факторов может образовываться структура смешанного типа или может исчезнуть одна из указанных типичных структурных зон. Основное отличие структуры непрерывнолитых слитков от обычных заключается в сравнительно более высокой дисперсности дендритного строения, относительно большей протяженности корковой мелкозернистой зоны и столбчатых дендритов, а также меньшем развитии осевой зоны неориентированных дендритов.

Наиболее осязаемое влияние на структуру непрерывнолитого металла оказывают размеры поперечного сечения, химический состав стали, температура металла, скорость разливки, интенсивность теплоотвода.

Увеличение температуры металла приводит к значительному развитию столбчатых кристаллов.

В условиях интенсивного теплоотвода с поверхности и незначительного понижения температурного градиента, структура непрерывнолитого слитка характеризуется наружной зоной мелких кристаллов и зоной столбчатой кристаллизации, распространяющейся до центра.

Уменьшение размеров поперечного сечения непрерывнолитого слитка сопровождается развитием мелкодендритного и тонкодисперсного строения всех структурных зон.

Химический состав стали оказывает очень большое влияние на соотношение структурных зон. Величина зоны столбчатых дендритов для углеродистой стали зависит от содержания углерода. Наибольшую склонность к транскристаллизации имеют высокоуглеродистые стали.

Для непрерывной разливки стали на машинах радиального типа весьма важно учесть возможность возникновения дефектов, связанных с выделением газов при кристаллизации. Вероятность возникновения пороков, связанных с выделением газов в виде особой фазы из раствора, в непрерывных слитках меньше, чем в обычных. Однако в твердом металле остается довольно много водорода и азота, которые неизбежно будут выделяться в той или иной мере в процессе охлаждения металла и поэтому вполне возможно образование флокенов и микротрещин.

Целесообразность уменьшения содержания водорода в металле, особенно при производстве качественных сталей, подчеркивается многими исследователями. При повышении содержания водорода в стали в непрерывном слитке появляются подкорковые пузыри – источники образования плёнок. Водород способствует увеличению пористости.

Неоднородность дендритного строения, неравномерное распределение неметаллических включений и газов, неоднородность химического состава, возникающие при кристаллизации слитка, в значительной мере определяют уровень механических свойств литого металла. Неоднородность литого металла наследственно переходит в прокат и влияет на его свойства.

Известно, что механические свойства металла обычных слитков, даже при наличии слабо выраженных ликвационных зон, ухудшаются от поверхности к оси. Особенно резко это проявляется в зоне столбчатых дендритов, несколько медленнее во внутренней зоне и наиболее значительно в осевой зоне. Вредное влияние на пластические свойства стали оказывают неметаллические включения, сосредоточенные в определенных зонах слитка.

В стальных слитках, получаемых на радиальных машинах непрерывной разливки, также имеется неоднородность механических свойств в поперечном сечении.

Для сравнения механических свойств литого металла на противоположных криволинейных сторонах слитка отбирали образцы (для испытания на растяжение) в зонах с одинаковым и разным дендритным строением, а также в местах с различным содержанием неметаллических включений и газов [1].

Экспериментальные данные показали, что прочностные характеристики металла распределены равномерно, включая осевую зону. Относительное удлинение, ударная вязкость и главным образом относительное сужение понижаются в зоне столбчатых дендритов на стороне с меньшим радиусом на определенном расстоянии от поверхности. Выравнивание указанных характеристик механических свойств по противоположным криволинейным сторонам слитка происходит в конце зоны столбчатых дендритов по стороне с меньшим радиусом и в соответствующей ей по том же расстоянии от поверхности зоне крупных неориентированных дендритов по стороне с большим радиусом. Минимальные значения пластических свойств и ударной вязкости наблюдали в осевой зоне слитка.

Осевая зона непрерывного слитка наиболее загрязнена неметаллическими включениями, газами, кроме того, она является местом сильного развития ликвации примесей и образования усадочной пористости. Весь этот комплекс неоднородностей и приводит к получению самых низких значений пластических свойств и ударной вязкости в криволинейном непрерывном слитке.

Для повышения уровня механических свойств в осевой зоне непрерывного слитка необходимо уменьшить сегрегацию неметаллических включений, газов, ликвацию примесей и усадочных дефектов.

Для получения однородных механических свойств необходимо обеспечить при прокатке непрерывнолитых заготовок определенную вытяжку (степень обжатия).

Если обобщить литературные данные, то можно сказать, что однородные механические свойства проката получаются при вытяжке от 5 до 18 в зависимости от профиля слитка, марки стали и назначения проката.

Неоднородность дендритного строения устраняется при более высоких степенях деформации.

3.2 Исследование химического состава непрерывнолитых слябов

Исследовали химический состав непрерывнолитых слябов из стали 08Ю, используемой для производства белой жести.

Объем партии непрерывнолитых слябов из стали марки 08Ю для исследования химического состава составил более 20 плавов, общей массой более 3000т. Химический состав стали этих слябов определили по паспортам плавов. Химический состав стали поплавно приведен в таблице 3.1. В последних двух строках таблицы 3.1 для сопоставления

указаны диапазоны изменения содержания элементов в стали 08Ю (непрерывнолитой) и 08кп (слиточного производства).

Данные таблицы 3.1 показывают, что содержание таких упрочняющих элементов, как углерод, марганец, азот, а также серы и фосфора, снижающих пластические свойства стали, ниже, чем в стали 08КП, ранее разливаемой в слитки. В частности, содержание углерода в непрерывнолитом металле достигает максимум 0,073 %. В стали 08КП содержание углерода находится в пределах 0,06-0,09 %. Содержание серы в непрерывнолитых слябах находится в пределах 0,005-0,017 %, в то время как в стали 08КП сера может находиться в количестве до 0,025 % по массе. Среднее содержание марганца в слиточной стали составляет 0,38 %, что примерно на 30% больше его содержания в непрерывнолитых слябах (максимальное содержание марганца в стали 08Ю составляет 0,27 %). Как известно, фосфор и азот являются элементами, наиболее сильно упрочняющими сталь. В слиточной стали среднее содержание фосфора составляет 0,03 %, а азота 0,04-0,05 %. Непрерывнолитой металл в отношении данных элементов значительно чище ($P \leq 0,017$ %, $N \leq 0,008$). Среднее содержание кремния в металле опытных плавок превышает средний уровень кремния в стали 08КП в два раза: 0,022 % против 0,010 %, соответственно.

Как известно, введение в сталь алюминия позволяет снизить вредное влияние азота на пластические свойства, а также предотвратить дальнейшее старение стали в готовом прокате. Согласно последних исследований, для гарантированной связки азота в нитриды требуется алюминия в 10 раз превышающего содержание азота в стали. Американские исследователи применяют такой показатель как отношение Al/N_2 , который в штампуемой стали должен превышать 10. Из таблицы 3.1. видно, что для непрерывнолитой стали этот показатель находится в довольно широких пределах: 4,24-25,5.

Наряду с перечисленными факторами, немаловажную роль в получении металла для глубокой вытяжки и штамповки играет однородность химического состава по всему объему сляба. Для оценки количественного распределения в слябе углерода, определяющего равномерность механических свойств проката, а также серы, определяющей наличие неметаллических включений и чистоту непрерывнолитого металла, по всему объему слябов были отобраны образцы на определение содержания углерода и серы. На рисунках 3.1 и 3.2 показаны распределения углерода и серы в непрерывнолитых слябах в сравнении со слябами 08КП и 08Ю (катаные). Данные показывают, что металл слябов непрерывного литья характеризуется наиболее равномерным распределением указанных химических элементов по всему объему сляба.

Таблица 3.1 – Химический состав непрерывнолитого металла

№ п/п	Массовая доля, %							
	C	Mn	Si	S	P	Al	N	Al/N
1	0,060	0,200	0,019	0,0060	0,0050	0,047	0,0030	15,56
2	0,057	0,202	0,014	0,0083	0,0068	0,039	0,0030	13,00
3	0,046	0,188	0,023	0,0092	0,0073	0,043	0,0026	16,54
4	0,057	0,208	0,016	0,0070	0,0060	0,051	0,0030	17,00
5	0,050	0,190	0,020	0,0080	0,0070	0,051	0,0020	25,50
6	0,051	0,206	0,022	0,0078	0,0076	0,050	0,0020	25,00
7	0,061	0,160	0,020	0,0050	0,0040	0,055	0,0030	15,87
8	0,054	0,175	0,016	0,0120	0,0060	0,052	0,0031	16,77
9	0,056	0,180	0,022	0,0090	0,0050	0,046	0,0027	17,04
10	0,073	0,238	0,022	0,0170	0,0090	0,059	0,0046	12,83
11	0,073	0,238	0,022	0,0170	0,0090	0,059	0,0046	12,83
12	0,040	0,250	0,030	0,010	0,013	0,028	0,0066	4,24
13	0,030	0,250	0,030	0,015	0,019	0,037	0,0077	4,80
14	0,020	0,200	0,020	0,009	0,012	0,032	0,0070	4,57
15	0,030	0,260	0,020	0,010	0,018	0,032	0,0043	7,44
16	0,030	0,200	0,020	0,010	0,012	0,042	0,0080	5,25
17	0,040	0,270	0,027	0,012	0,011	0,032	0,0075	4,27
18	0,020	0,240	0,020	0,009	0,015	0,037	0,0056	6,61
19	0,040	0,200	0,020	0,011	0,012	0,065	0,0053	12,26
20	0,030	0,260	0,020	0,006	0,012	0,050	0,0052	9,62
21	0,030	0,260	0,040	0,010	0,017	0,060	0,0076	7,89
22	0,040	0,270	0,030	0,008	0,010	0,050	0,0060	8,33
23	0,020	0,220	0,020	0,009	0,016	0,038	0,0070	5,43
Диапазон 08Ю	0,02- 0,073	0,16-0,27	0,014- 0,040	0,006- 0,017	0,004- 0,019	-	0,002- 0,008	-
Диапазон 08КП	0,06- 0,090	0,26-0,42	0,01-0,015	0,010- 0,025	0,02-0,05	-	0,04-0,05	-

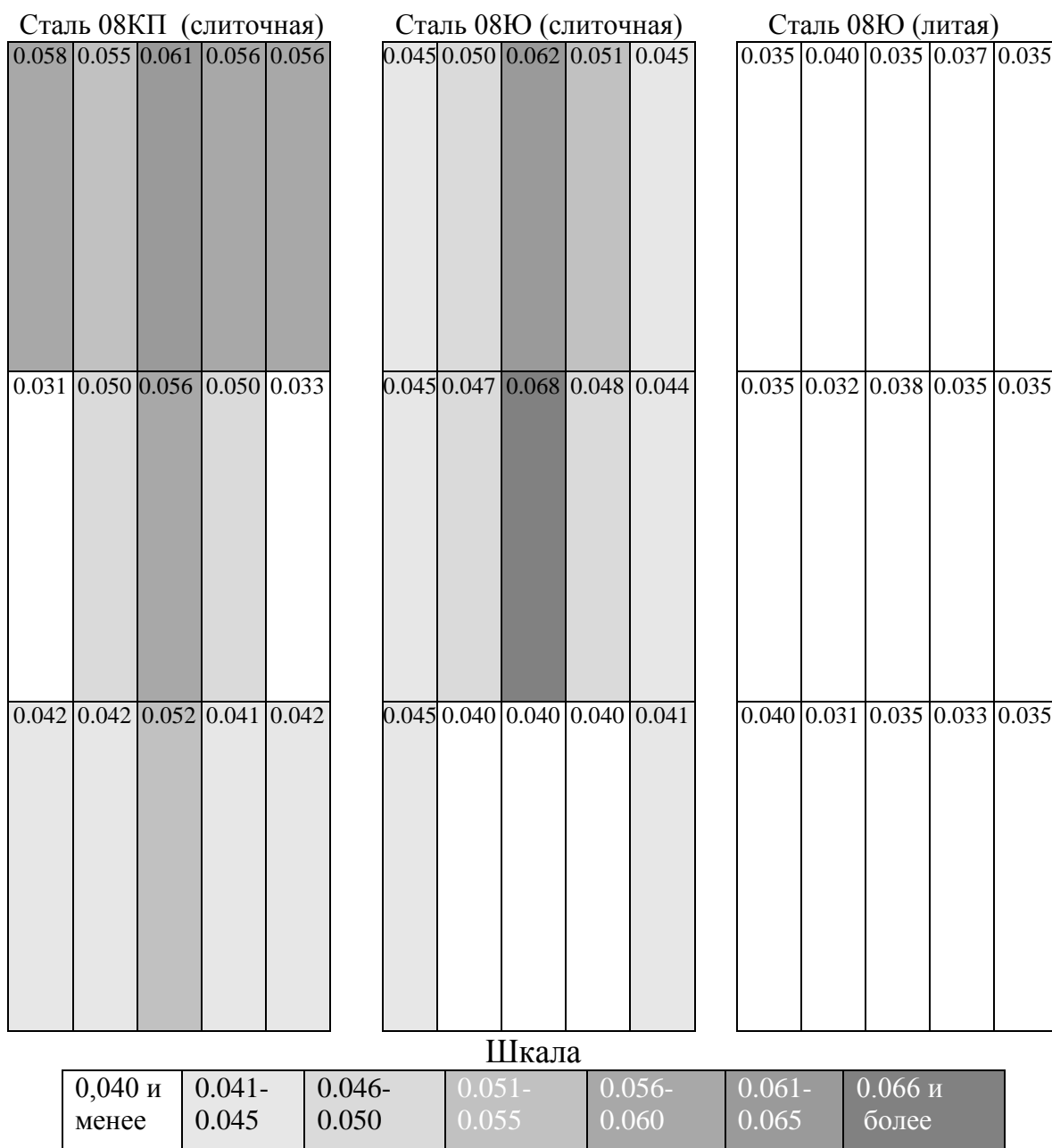


Рисунок 3.1 – Распределение углерода по длине и ширине слэбов, %

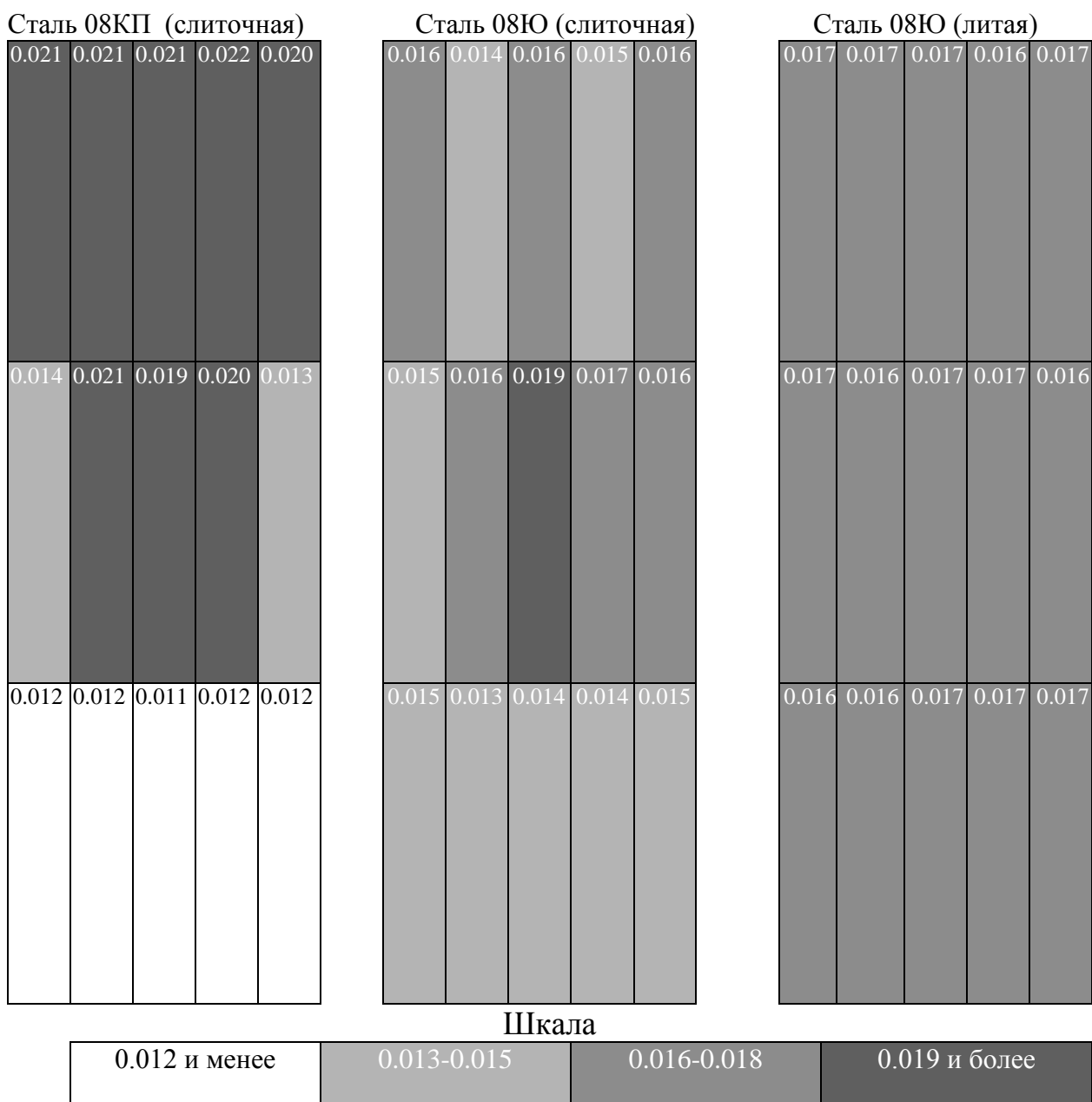


Рисунок 3.2 – Распределение серы по длине и ширине слэбов, %

3.3 Оценка качества макроструктуры непрерывнолитых слэбов

Общеизвестным является факт негативного влияния серы на качество металла. Поэтому вопросам снижения содержания серы в стали всегда уделялось особое внимание. Актуальность их возрастает в случае её разливки на МНЛЗ, где требуется получение низких концентраций серы даже в металле обычного состава для обеспечения качественной структуры и поверхности непрерывнолитого слэба [1].

В этой связи в кислородно-конвертерном цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» с целью оценки качества внутренней структуры слэбов

низкоуглеродистой стали, отлитых на МНЛЗ, был выполнен анализ серных отпечатков. Была проведена интегрированная оценка качества макроструктуры по осевой сегрегации, осевым и зональным включениям и степени развития внутренних трещин (не сплошностей) в слябах непрерывной разливки [4].

Оценка качества макроструктуры проводилась в баллах (min - 0 баллов, max - 4 балла) согласно требований МВИ ККЦ - 93 - 2004 «Метод контроля макроструктуры слябов МНЛЗ».

Параллельно оценивалось влияние некоторых параметров разливки, в частности скорости разливки и ширины литых слябов; на качественные показатели слябов.

Многие исследователи склонны считать, что одной из главных причин развития внутренних трещин в литой заготовке является сера. Так, в работе [5] причиной образования центральной пористости указываются повышенное содержание ликвирующих элементов, прежде всего серы, а также фосфора, кислорода и меди, повышенные температура и скорость вытягивания заготовки. Аналогичные данные приводятся в работе [6], где констатируется, что количество заготовок с осевыми трещинами возрастает с увеличением содержания серы в стали, уменьшением отношения марганца к сере.

Гистограмма распределения уровня качества внутренней структуры литых заготовок МНЛЗ представлена на рисунке 3.3, из которого следует, что 20,8% темплетов имеют дефектность 2,5 балла и более.

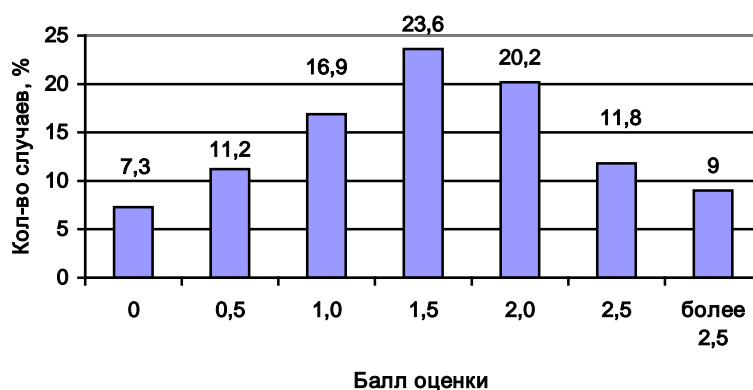


Рисунок 3.3 – Частотное распределение уровня качества внутренней структуры слябов

На рисунке 3.4, представлены качественные показатели внутренней структуры слябов из низкоуглеродистого металла. Для каждого балла оценки качества макроструктуры слябов от 0 до 2,5 и более с шагом 0,5 делалась выборка концентраций серы по темплетам, отобранным с более чем 180 плавок.

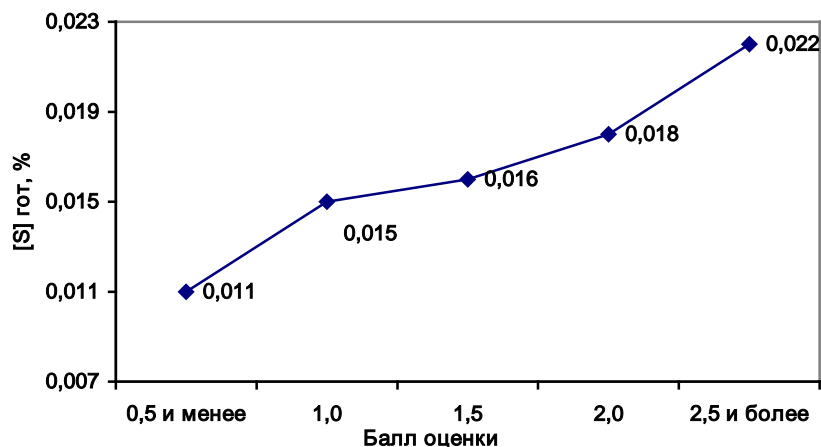


Рисунок 3.4 – Связь между $[S]_{\text{гот}}$ и качеством внутренней структуры низкоуглеродистых слэбов

Результаты опытных плавов обработаны статистическими методами. Они подтверждают сведения, представленные в работах [1, 5-7], о негативном влиянии серы на качество литых заготовок. С увеличением её содержания в металле снижается качество литых заготовок. Рисунок 3.4 показывает, что для получения удовлетворительной оценки макроструктуры (до 2-го балла включительно) содержание серы для углеродистого металла должно находиться в пределах, не превышающих 0,018%.

Изучение температурно-скоростных режимов разливки стали показало, что повышение скорости разливки способствует развитию дефектности литых заготовок (рисунок 3.5).

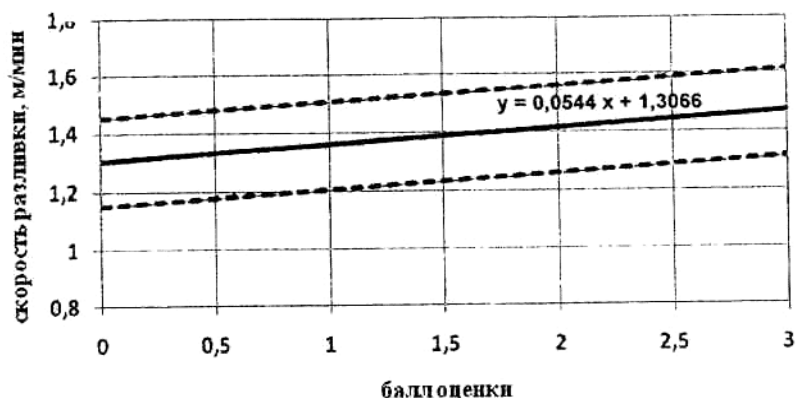


Рисунок 3.5 – Связь между скоростью разливки и степенью развития поперечных внутренних трещин в слэбах

Негативное воздействие повышенных скоростей вытягивания отмечается в работах [5-7], где указывается, что осевые трещины чаще возникают при отливке слэбов со скоростями, превышающими некоторое критическое значение. От скорости разливки зависит протяженность (глубина) жидкой лунки, т.е. расположение места окончания кристаллизации по длине технологической линии МНЛЗ. При увеличении скорости

протяженность лунки возрастает и место окончания затвердевания приближается к началу зоны разгиба. При скорости разливки более критической приходится разгибать заготовку с не затвердевшей осевой зоной. При этом снижение механических свойств металла вследствие увеличения содержания серы и снижения отношения марганца к сере приводит к увеличению отбраковки металла по трещинам.

Значительный разброс экспериментальных данных не противоречит влиянию скорости разливки на качество литой заготовки, а лишь свидетельствует о том, что этот показатель зависит и от других технологических факторов.

Не выявлено значимой связи между сечением отливаемых слябов и их качеством на средних (1000-1200 мм) и широких (более 1200 мм) профилях на всем сортаменте отливаемого металла. Выборку данных, полученную на профилях шириной до 1000 мм нельзя считать представительной из-за малого количества исследуемых темплетов (менее 5% от общего количества) (рисунок 3.6).

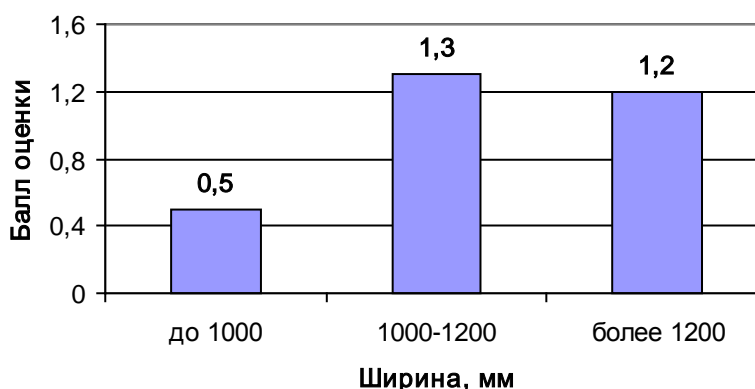


Рисунок 3.6 – Зависимость качества внутренней структуры от ширины слябов

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что получение удовлетворительной макроструктуры отливаемого на МНЛЗ низкоуглеродистого металла может быть гарантировано при содержании серы в готовой стали не более 0,018 %. Повышение скорости разливки способствует развитию дефектности непрерывнолитых слябов.

3.4 Исследование свойств горячекатаного листа

Исследованию подвергали 10 рулонов горячекатаного металла, прокатанных из непрерывнолитых слябов стали 08ю. Для сопоставления использовали данные ранее выполненных исследований свойств горячекатаных полос, полученные из слиточной стали 08кп. Полосы имели толщину 3,5 мм и ширину 1265 мм. Также исследовали 10 рулонов

холоднокатаного металла, произведенных из горячекатаного металла указанных выше марок сталей и размеров на пятиклетевом стане 1700 ЛПЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» до размеров 1,1×1265 мм.

Вырезку стандартных образцов для исследования технологических свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, твердость, балл зерна, а так же глубина лунки, коэффициент пластической анизотропии и показатель деформационного упрочнения для холоднокатаного металла) производили из хвостовой части рулонов по краям и середине.

Любые измерения, в том числе и испытания механических свойств металлов, всегда проводят с некоторыми погрешностями, которые могут накапливаться по этапам исследования: от подготовки образцов до графического представления результатов испытаний.

Так, при испытаниях на растяжение на разрывной испытательной машине суммарная систематическая ошибка будет складываться из погрешности фиксирования усилия силомером и из погрешности измерения образцов штангенциркулем:

$$\sum \gamma(x) = \gamma(x_1) + \gamma(x_2), \quad (3.1)$$

где $\sum \gamma(x)$ - суммарная относительная погрешность;

$\gamma(x_1)$ - относительная погрешность измерения усилия;

$\gamma(x_2)$ - относительная погрешность измерения образцов штангенциркулем.

Относительную погрешность измерения рассчитываем по формуле:

$$\gamma(x) = \frac{\Delta(x)}{x} 100\%, \quad (3.2)$$

где $\Delta(x)$ – абсолютная погрешность измерения;

x - значение измеряемой величины.

Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta(x) = \frac{\gamma_0 \cdot X_K}{100}, \quad (3.3)$$

где γ_0 – класс прибора или погрешность измерения прибора;
 X_K – предел измерений.

Установили что, например, при испытаниях образцов на растяжение относительная погрешность составляет 1,8%. Поэтому при расчете предела текучести абсолютная погрешность составляет 6,3 МПа, предела прочности – 9,8 МПа, относительного удлинения – 0,97%.

Производилась математическая обработка результатов механических испытаний.

Основными статистическими характеристиками, используемыми при математической обработке результатов исследований свойств, являются [8]:

1) выборочная средняя

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad (3.4)$$

где x_i – значение величины;

n – объем выборки.

2) выборочная дисперсия

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1); \quad (3.5)$$

3) выборочное среднее квадратичное отклонение

$$S = \sqrt{S^2}; \quad (3.6)$$

4) несмещенная оценка среднего квадратичного отклонения

$$\bar{S} = K \cdot S, \quad (3.7)$$

где K – поправочный коэффициент, зависящий от объема выборки.

Отсев грубых погрешностей результатов эксперимента производился с использованием критерия Смирнова Н.М. [8]:

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{S} \leq u_{kp}, \quad (3.8)$$
$$u_n = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{S} \leq u_{kp},$$

Где x_{\min} , x_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значение вариационного ряда;

$u_{кр}$ – критическое значение критерия Смирнова при заданных значениях уровня значимости α и объема выборки.

Исследование механических свойств и структуры горячекатаного металла производили по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 5639-82. Результаты исследования сведены в таблицы 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты исследования механических свойств и структуры горячекатаных полос, сталь 08кп

Номер рулона	По ширине	Балл зерна	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	HRB
1	2	3	4	5	6	7
1	край	10-11	350	266	16	60
	середина	10-11	365	284	20,4	62
	край	9-10	354	265	18,1	59,4
2	край	7-8	420	386	32,4	78,1
	середина	8-9	450	410	35	79,5
	край	8-9	435	392	30,8	76,4
3	край	9-10	394	351	25	69,4
	середина	9-10	402	369	27,4	70,7
	край	9-10	388	348	24,1	68,6
4	край	7-8	357	269	18,1	64,8
	середина	8-9	369	294	24	67,3
	край	7-8	360	271	21,9	65,1
5	край	8-9	412	390	27,8	70,1
	середина	8-9	432	394	30,4	74,5
	край	8-9	416	381	27,2	72,8
6	край	10-11	442	407	30,8	77,4
	середина	10-11	448	410	34,2	79,1
	край	9-10	437	398	29,4	76,1
7	край	10-11	394	367	24,8	68,4
	середина	10-11	416	381	29,7	70,3
	край	10-11	420	350	25,1	69,5
8	край	9-10	367	270	21,7	65
	середина	10-11	384	294	25,7	67,5
	край	9-10	381	284	20,3	64,5
9	край	9-10	401	371	26,1	70,4
	середина	9-10	425	384	29,7	73,8
	край	10-11	416	365	24,6	70,5
10	край	10-11	402	298	26,8	67,9
	середина	10-11	408	317	31,7	71,5
	край	9-10	394	302	27,9	68,5

Таблица 3.3 – Результаты исследования механических свойств и структуры горячекатаных полос, сталь 08Ю

Номер рулона	По ширине	Балл зерна	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	HRB
1	2	3	4	5	6	7
1	край	10-11	360	250	30,0	60,5
	середина	10-11	362	274	32,1	62,1
	край	10-11	355	267	30,8	61,8
2	край	9-10	387	298	35,1	69,5
	середина	10-11	392	304	36,2	70,2
	край	10-11	384	302	36,1	69,9
3	край	9-10	408	312	34,9	71,6
	середина	9-10	410	325	37,0	72,0
	край	9-10	406	323	36,6	70,8
4	край	10-11	384	290	34,8	66,4
	середина	10-11	381	291	35,2	67,2
	край	9-10	378	296	35,0	66,8
5	край	10-11	367	301	31,9	61,2
	середина	10-11	368	315	32,6	60,9
	край	10-11	366	310	32,0	62,0
6	край	9-10	360	267	31,4	62,4
	середина	10-11	362	269	32,1	63,5
	край	9-10	361	257	30,7	62,7
7	край	10-11	401	320	36,0	70,0
	середина	10-11	405	324	36,1	71,2
	край	10-11	406	325	35,6	70,6
8	край	9-10	388	261	32,4	68,5
	середина	10-11	390	274	33,1	68,0
	край	10-11	385	268	32,0	67,9
9	край	9-10	375	304	34,5	66,7
	середина	9-10	379	306	35,1	66,9
	край	9-10	381	302	34,8	65,4
10	край	9-10	372	276	34,7	64,1
	середина	10-11	376	284	34,0	65,0
	край	10-11	370	280	33,7	63,8

Произведем отсев грубых ошибок.

Основные статистические характеристики и критерий Смирнова для горячекатаного проката из сталей 08кп и 08Ю приведены в таблице 3.4. При расчете несмещенной оценки среднего квадратического отклонения поправочный коэффициент принят равным 1,128.

Сравнивая значения вычисленных статистик u_l и u_n для прочностных и пластических показателей с критическим значением критерия Смирнова,

взятого для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и при объеме выборки $n = 30$ имеем, что для всех характеристик расчетные значения критерия Смирнова меньше табличного. Следовательно, минимальные и максимальные значения показателей не являются грубыми ошибками.

Таблица 3.4 – Статистические характеристики и критерий Смирнова

Механические характеристики	Статистические характеристики				Критерий Смирнова		
	\bar{x}	S^2	S	\bar{S}	u_1	u_n	$u_{кр}$
Горячекатаный металл 08кп							
предел прочности	401,3	853,6	29,2	32,95	1,55	1,48	3,65
предел текучести	342,7	2678,9	76,7	86,5	0,90	0,78	3,65
относительное удлинение	26,24	23,18	4,81	5,43	1,88	1,61	3,65
твердость	69,97	28,46	5,33	6,02	1,66	1,58	3,65
Горячекатаный металл 08ю							
предел прочности	380,63	264,1	16,2	18,33	1,40	1,60	3,65
предел текучести	292,5	497,6	22,3	25,16	1,70	1,29	3,65
относительное удлинение	33,88	3,87	1,97	2,22	1,75	1,41	3,65
твердость	66,32	13,17	3,63	4,09	1,42	1,39	3,65

По статистически обработанным данным механических испытаний построены диаграммы разброса прочностных, пластических свойств и твердости для горячекатаных полос, произведенных из слиточного и непрерывнолитого металла (рисунки 3.7 – 3.10).

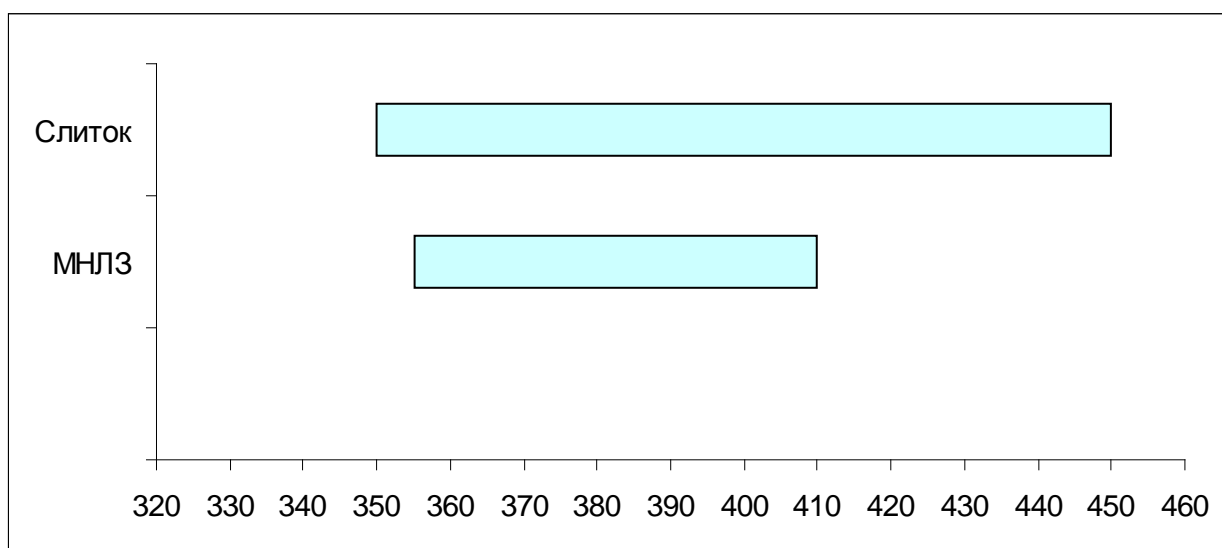


Рисунок 3.7 – Предел прочности, МПа

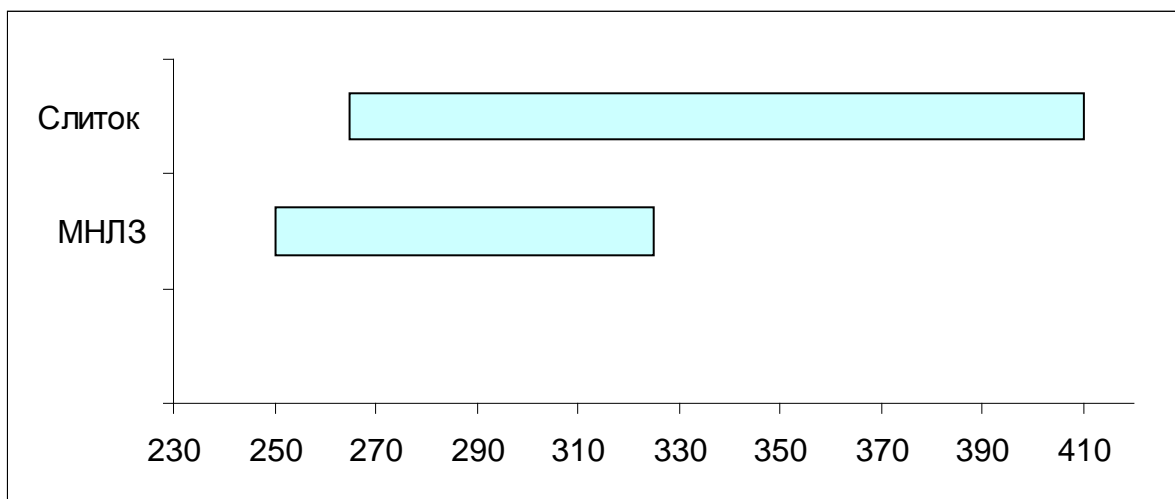


Рисунок 3.8 – Предел текучести, МПа

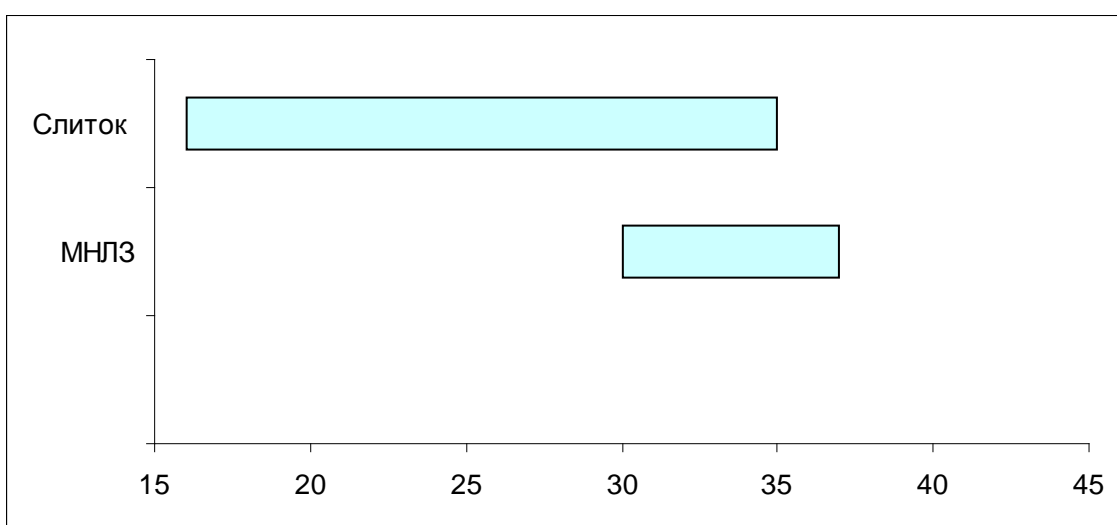


Рисунок 3.9 – Относительное удлинение, %

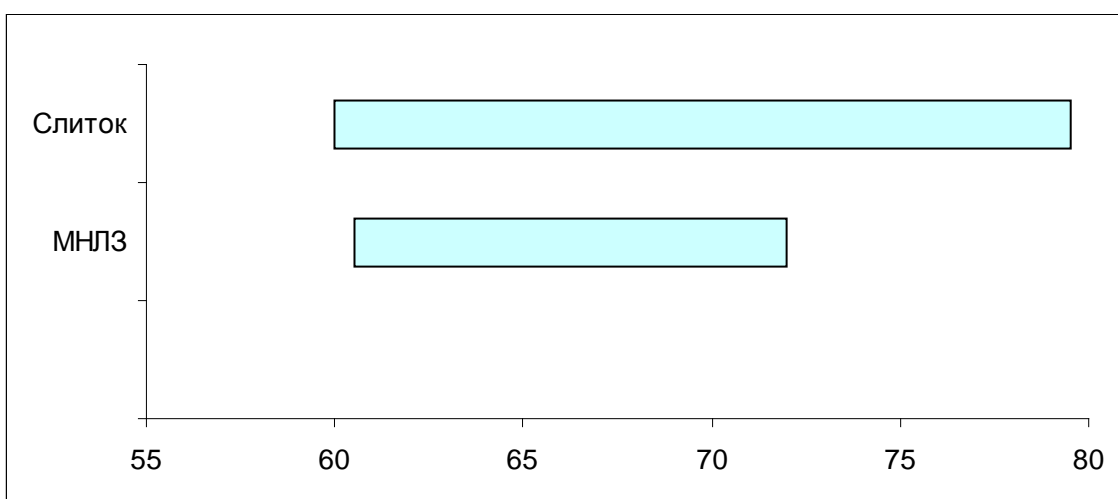


Рисунок 3.10 – Твердость, HRB

Диаграммы показывают, что свойства полос произведенных из непрерывнолитых заготовок характеризуются большей стабильностью,

меньшим размахом колебания по сравнению с полосами, полученными из слиточного металла. С этой точки зрения можно говорить о лучшем качестве непрерывнолитого металла по сравнению со слиточным, в частности о большей пластичности.

3.5 Определение свойств холоднокатаного листа

Исследование механических свойств и структуры холоднокатаного металла производили по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 5639-82, ГОСТ 10510-80. Результаты исследования сведены в таблицу 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5 – Результаты исследования механических свойств и структуры холоднокатаных полос, сталь 08кп

Номер рулона	По ширине	Балл зерна	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	HRB	Глубина лунки, мм	R	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	край	9-10	350	254	32,1	50,2	10,1	1,19	0,20
	середина	9-10	357	259	33,5	51,3	11,0	1,19	0,19
	край	9-10	356	259	33,0	51,2	10,4	1,24	0,19
2	край	10-11	402	315	25,0	56,4	9,8	1,15	0,21
	середина	10-11	405	320	26,7	57,0	9,5	1,15	0,21
	край	10-11	403	318	26,2	57,0	9,6	1,17	0,20
3	край	10-11	381	294	36,4	52,4	11,5	1,5	0,20
	середина	10-11	397	300	36,4	53,7	11,7	1,45	0,19
	край	9-10	390	298	35,7	50,6	10,9	1,48	0,19
4	край	8-9	305	180	38,9	48,0	13,3	1,32	0,18
	середина	9-10	312	192	41,0	48,8	13,0	1,35	0,19
	край	9-10	309	190	39,5	49,1	13,1	1,30	0,18
5	край	10-11	360	246	32,4	52,5	11,2	1,20	0,2
	середина	10-11	371	246	35,2	52,4	11,4	1,21	0,21
	край	10-11	365	240	34,7	53,0	10,9	1,19	0,21
6	край	10-11	380	295	37,1	55,1	10,1	1,36	0,18
	середина	10-11	381	301	38,0	55,6	10,5	1,38	0,18
	край	10-11	378	296	37,8	54,9	10,4	1,39	0,18
7	край	9-10	334	214	29,5	50,7	9,6	1,46	0,20
	середина	9-10	332	215	29,4	51,0	9,5	1,42	0,20
	край	10-11	346	220	30,6	52,4	9,8	1,43	0,21
8	край	10-11	392	300	38,0	55,8	10,7	1,25	0,21
	середина	10-11	398	302	38,1	56,0	9,9	1,30	0,21
	край	10-11	390	305	38,0	54,8	10,1	1,34	0,20
9	край	9-10	350	247	33,4	49,0	10,0	1,26	0,19
	середина	9-10	357	242	33,7	48,8	10,8	1,20	0,19
	край	10-11	351	250	34,0	49,4	10,6	1,24	0,19

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	край	10-11	402	314	40,0	56,5	11,9	1,18	0,19
	середина	10-11	404	317	39,5	55,9	12,0	1,20	0,20
	край	10-11	404	311	39,4	55,8	11,7	1,20	0,20

Таблица 3.6 – Результаты исследования механических свойств и структуры холоднокатаных полос, сталь 08ю

Номер рулона	По ширине	Балл зерна	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	HRB	Глубина лунки, мм	R	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	край	11-12	382	275	32,0	54,9	10,6	1,15	0,19
	середина	11-12	385	275	32,5	55,0	10,6	1,31	0,19
	край	11-12	385	270	32,5	54,6	10,9	1,39	0,20
2	край	11-12	364	259	36,4	52,6	11,1	1,25	0,21
	середина	11-12	359	261	35,8	53,1	11,5	1,42	0,21
	край	10-11	360	257	36,7	52,9	11,4	1,38	0,21
3	край	11-12	342	260	35,7	50,4	12,0	1,32	0,22
	середина	11-12	348	265	35,0	50,9	12,1	1,54	0,24
	край	11-12	346	263	36,0	50,3	11,7	1,85	0,2
4	край	10-11	315	180	37,2	47,0	12,1	1,97	0,23
	середина	10-11	316	182	36,8	47,8	12,5	1,68	0,24
	край	10-11	321	181	36,6	47,1	12,0	1,70	0,23
5	край	11-12	319	200	38,1	49,4	12,8	1,87	0,21
	середина	11-12	320	195	39,0	49,9	12,9	1,68	0,2
	край	11-12	320	198	38,8	50,0	12,6	1,57	0,19
6	край	10-11	315	181	35,1	47,9	10,9	2,01	0,24
	середина	10-11	319	186	35,0	48,6	11,0	1,95	0,23
	край	11-12	320	184	34,9	48,9	11,3	1,96	0,23
7	край	11-12	376	268	33,4	52,0	11,6	1,57	0,21
	середина	11-12	380	270	33,8	53,1	11,9	1,67	0,2
	край	11-12	380	270	32,9	52,6	12,0	1,54	0,2
8	край	11-12	368	254	36,4	55,0	11,5	1,19	0,19
	середина	11-12	369	250	36,0	54,6	11,5	1,24	0,19
	край	11-12	360	247	36,0	54,6	11,5	1,20	0,2
9	край	11-12	350	200	34,5	50,0	10,9	2,00	0,19
	середина	11-12	351	204	35,0	50,8	11,4	1,98	0,2
	край	11-12	346	201	34,9	50,1	11,0	1,86	0,21
10	край	10-11	345	210	33,6	51,1	11,6	1,19	0,21
	середина	11-12	345	215	35,1	51,6	11,8	1,30	0,22
	край	11-12	341	212	34,7	51,3	11,2	1,25	0,22

По аналогии с предыдущим выполнен расчет основных статистических характеристик и критерий Смирнова (таблица 3.7). Произведен отсев грубых ошибок.

Таблица 3.7 – Статистические характеристики и критерий Смирнова

Механические характеристики	Статистические характеристики				Критерий Смирнова		
	\bar{x}	S^2	S	\bar{S}	u_1	u_n	$u_{кр}$
Холоднокатаный металл 08кп							
предел прочности	368,73	906,06	30,1	33,9	1,88	1,07	3,65
предел текучести	268	1852	43,0	48,5	1,81	1,07	3,65
относительное удлинение	34,77	18,69	4,32	4,88	2,0	1,28	3,65
твердость	52,84	8,33	2,89	3,26	1,48	1,28	3,65
глубина лунки	10,83	1,15	1,07	1,21	1,1	2,04	3,65
показатель R	1,29	0,012	0,11	0,123	1,14	1,71	3,65
показатель n	0,196	0,0001	0,01	0,012	1,33	1,17	3,65
Холоднокатаный металл 08ю							
предел прочности	348,23	562,74	23,7	26,76	1,24	1,37	3,65
предел текучести	229,1	1291,5	35,9	40,54	1,21	1,13	3,65
относительное удлинение	35,35	3,11	1,76	1,99	1,68	1,83	3,65
твердость	51,27	5,92	2,43	2,74	1,56	1,36	3,65
глубина лунки	11,6	0,37	0,61	0,69	1,45	1,88	3,65
показатель R	1,57	0,0868	0,29	0,33	1,27	1,33	3,65
показатель n	0,21	0,0003	0,02	0,021	0,95	1,43	3,65

По статистически обработанным результатам механических испытаний построены диаграммы рассеяния прочностных, пластических свойств и твердости холоднокатаных полос, полученные из непрерывнолитого и слиточного металла (рисунки 3.11-3.17).

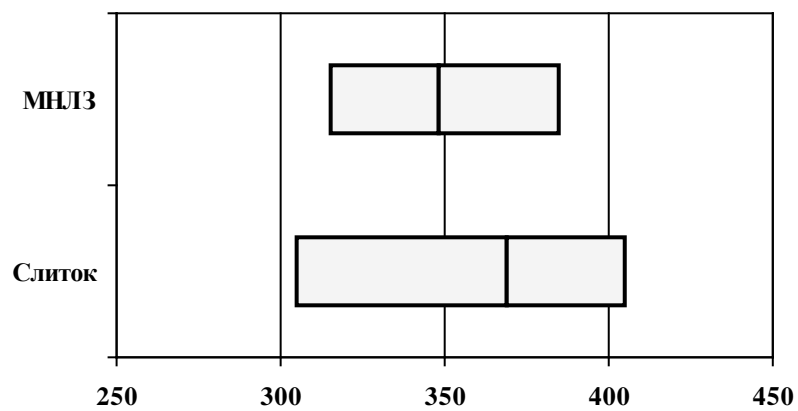


Рисунок 3.11 – Предел прочности, МПа

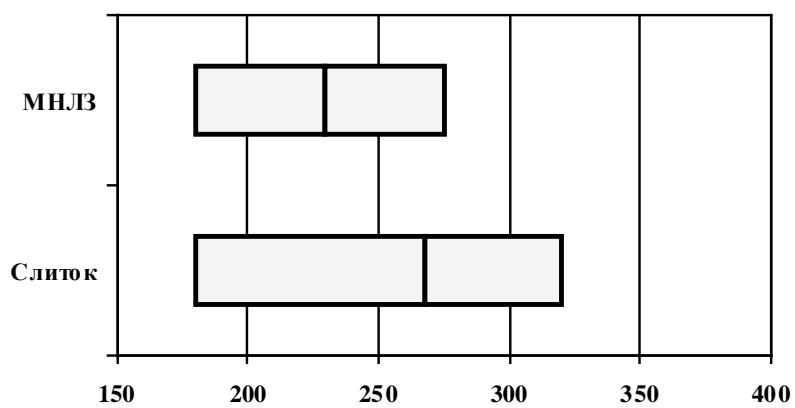


Рисунок 3.12 – Предел текучести, МПа

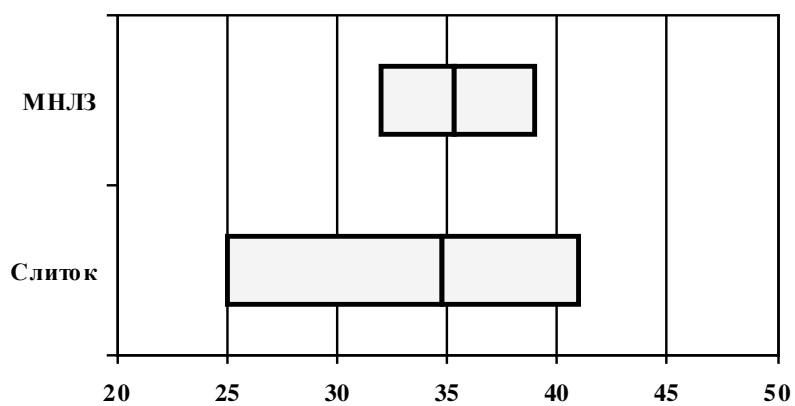


Рисунок 3.13 – Относительное удлинение, %

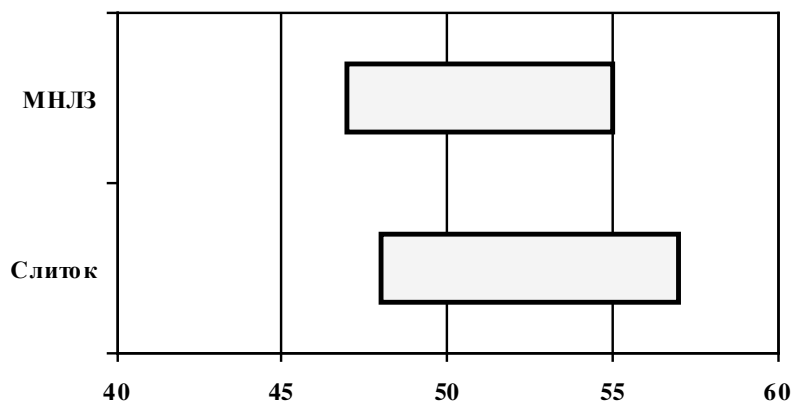


Рисунок 3.14 – Твердость (HRB)

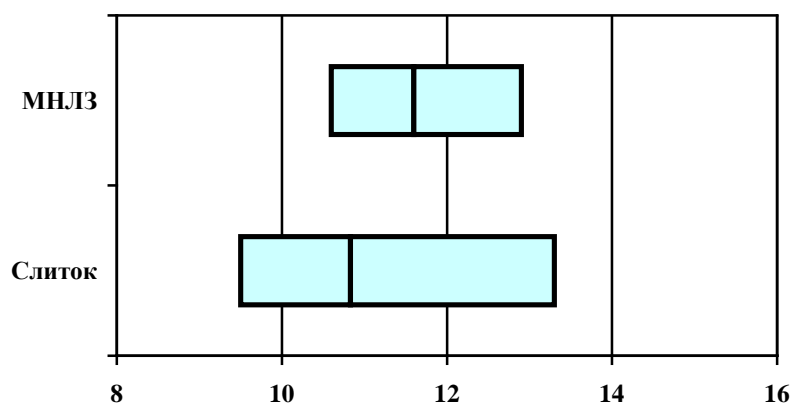


Рисунок 3.15 – Глубина лунки, мм

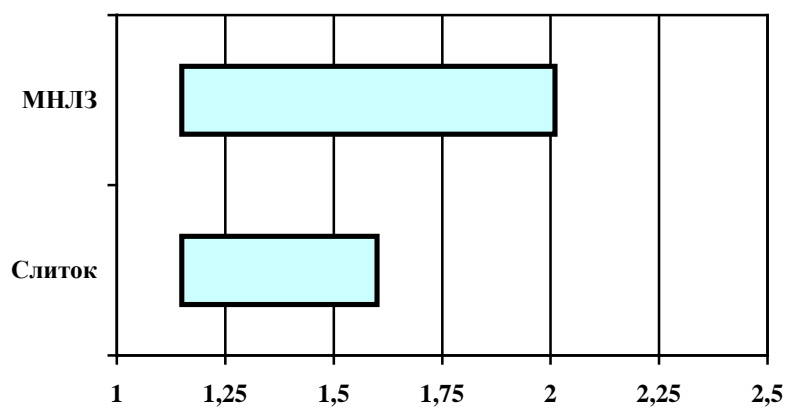


Рисунок 3.16 – Показатель штампуемости (R)

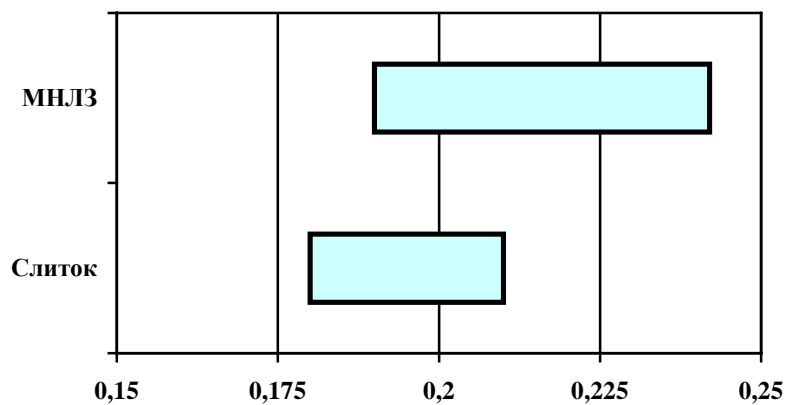


Рисунок 3.17 – Показатель штампуемости (n)

Диаграммы свидетельствуют, как и для горячекатаных полос, все показатели свойств холоднокатаных полос из непрерывнолитой стали, кроме показателей штампуемости отличаются большей стабильностью, более узким диапазоном колебаний, лучшей пластичностью.

4 Определение условий деформирования непрерывнолитого металла, обеспечивающих его максимальную пластичность

4.1 Исследование условий деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС 1700

Исследовали условия деформирования непрерывнолитых крупногабаритных слябов сечением 200×1410 мм и 200×1530 мм (сталь 3 СП и RRA36) в полосы различной толщины.

Температуру в методических нагревательных печах фиксировали термопарой с контроллером. Температуру перед клетью №6, а за клетью №12 и перед смоткой фиксировали радиационным пирометром.

Режим обжатию фиксировали с помощью продуктиметров в обеих группах клетей. Для черновых клетей имелась возможность экспериментального измерения мощности прокатки (с помощью мегаваттметра, диапазон измерений от 0 до 12 МВт, класс точности 1,5), для чистовых клетей – усилия прокатки (с помощью месдоз фирмы «Kelk»).

Экспериментальное исследование процесса прокатки полос вышеуказанных марок стали проводилось по фактическим параметрам прокатки полос по различным режимам.

Фиксировали также калорийность, расход топлива, продолжительность и скорость прокатки полос.

Температурный режим нагрева слябов в методических печах, калорийность, расход топлива приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Температурный режим нагрева в методических печах непрерывнолитых слябов

Марка стали	№ печи	Температура нагрева слябов по зонам печи, °С					Общее время нагрева, мин	Калорийность топлива, ккал/м ³	Расход топлива	
		1	2	3	4	5			газа, м ³ /ч	мазута, кг/ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3сп	1	1260	1076	1350	1170	1278	280	1456	48,1	1170
	2	1260	1100	1320	1160	1279			49,1	267
	3	1225	1065	1330	1165	1271			36,8	695
	4	1240	1100	1330	1183	1273			40,0	673
	1	1246	1075	1320	1190	1278	290	1480	36,2	980
	2	1270	1180	1330	1180	1250			38,4	500
	3	1230	980	1320	1212	1250			47,3	560

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Зсп	4	1250	1170	1330	1220	1265	290	1480	47,6	560
	1	1257	1075	1320	1190	1278			36,2	980
	2	1272	1150	1352	1180	1250			38,4	500
	3	1260	980	1341	1212	1250			47,3	560
	4	1280	1170	1343	1220	1265			47,6	560
RRA36	2	1270	1120	1360	1145	1277- 1290	235	1599	35,3	1064
	3	1250	920	1330	1129	1270- 1293			48,9	870
	4	1248	1100	1343	1220	1265- 1293			46,2	1115

Режимы обжатий и скорости прокатки в черновых и чистовых клетях НШПС – 1700 непрерывнолитых слябов в полосы различных размеров приведены в таблице 4.2-4.5.

Таблица 4.2 – Обжатия и скорости прокатки в горизонтальных валках непрерывнолитых слябов 200×1530 мм, сталь Зсп, в полосы 6×1500 мм (полоса №1)

Величина	Клетки черновой группы						
	ГО	№1	№2	№3	№4	№5	
h_0 , мм	200	165	125	97	77	57	
h_1 , мм	165	125	97	77	57	42	
Δh , мм	35	40	28	20	20	15	
ε	0,18	0,24	0,22	0,21	0,26	0,26	
v_{IP} , м/с	1	1	1,68	2,12	2,66	3,14	
Величина	Клетки чистовой группы						
	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
h_0 , мм	40	31,34	19,57	13,85	10,18	8,38	6,66
h_1 , мм	31,34	19,57	13,85	10,18	8,38	6,66	6
Δh , мм	8,66	11,77	5,72	3,67	1,80	1,72	0,66
ε	0,22	0,38	0,29	0,26	0,18	0,21	0,10
v_3 , м/с	0,78	1,28	1,81	2,48	3,04	3,87	4,33
v_{IP} , м/с	1,01	1,58	2,22	2,99	3,62	4,54	5,01

Таблица 4.3 – Обжатия и скорости прокатки непрерывнолитых слябов 200×1530 мм, сталь 3сп, в полосы 4,7×1490 мм (полоса №2)

Величина	Клетки черновой группы						
	ГО	№1	№2	№3	№4	№5	
h_0 , мм	200	163	122	96	70	56	
h_1 , мм	163	122	96	70	56	41	
Δh , мм	37	41	26	26	14	15	
ε	0,19	0,25	0,21	0,27	0,20	0,27	
v_{IP} , м/с	1	1	1,68	2,12	2,66	3,14	
Величина	Клетки чистовой группы						
	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
h_0 , мм	39	28,92	17,3	11,93	8,6	6,95	5,38
h_1 , мм	28,92	17,3	11,93	8,6	6,95	5,38	4,7
Δh , мм	10,08	11,62	5,37	3,33	1,65	1,57	0,68
ε	0,26	0,40	0,31	0,28	0,19	0,23	0,13
v_3 , м/с	0,78	1,30	1,89	2,62	3,24	4,19	4,80
v_{IP} , м/с	0,96	1,52	2,12	2,84	3,43	4,32	4,83

Таблица 4.4 – Обжатия и скорости прокатки непрерывнолитых слябов 200×1410 мм, сталь 3сп, в полосы 5,7×1380 мм (полоса №3)

Величина	Клетки черновой группы						
	ГО	№1	№2	№3	№4	№5	
h_0 , мм	200	163	122	96	70	56	
h_1 , мм	163	122	96	70	56	41	
Δh , мм	37	41	26	26	14	15	
ε	0,19	0,25	0,21	0,27	0,20	0,27	
v_{IP} , м/с	1	1	1,68	2,12	2,66	3,14	
Величина	Клетки чистовой группы						
	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
h_0 , мм	39	30,6	18,91	13,41	9,86	8,11	6,41
h_1 , мм	30,6	18,91	13,41	9,86	8,11	6,41	5,7
Δh , мм	8,4	11,69	5,5	3,55	1,75	1,7	0,71
ε	0,22	0,38	0,29	0,26	0,18	0,21	0,11
v_3 , м/с	0,72	1,16	1,7	2,31	2,85	3,62	4,11
v_{IP} , м/с	0,96	1,52	2,12	2,84	3,43	4,32	4,83

Таблица 4.5 – Обжатия и скорости прокатки непрерывнолитых слябов 200×1530 мм, сталь RRA36, в полосы 12×1500 мм (полоса №4)

Величина	Клетки черновой группы						
	ГО	№1	№2	№3	№4	№5	
h_0 , мм	200	166	124	95	68	56,5	
h_1 , мм	166	124	95	68	56,5	47	
Δh , мм	34	42	29	27	11,5	9,5	
ε	0,17	0,25	0,23	0,28	0,17	0,17	
$v_{\text{ПР}}$, м/с	1	1	1,68	2,12	2,66	3,14	
Величина	Клетки чистовой группы						
	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
h_0 , мм	45	36,61	25,15	19,11	15,1	13,52	-
h_1 , мм	36,61	25,15	19,11	15,1	13,52	12	-
Δh , мм	8,39	11,46	6,04	4,01	1,58	1,52	-
ε	0,19	0,31	0,24	0,21	0,1	0,11	-
v_3 , м/с	0,68	0,99	1,36	1,73	1,99	2,28	-
$v_{\text{ПР}}$, м/с	1,02	1,43	1,86	2,32	2,55	2,85	-

Экспериментальные и допустимые мощности приводных двигателей черновых клеток НШПС – 1700 представлены в таблице 4.6 и на рисунке 4.1.

Таблица 4.6 – Мощности двигателей черновых клеток при прокатке полос № 1 - № 4

Клетка (номер прохода)	Экспериментальные мощности двигателей, МВт				$N_{\text{дв доп}}$, МВт
	полоса №1	полоса №2	полоса №3	полоса №4	
ГО (1)	4,5	4,5	3,9	4,1	4,45
№1 (2)	3,8	4,1	3,8	3,8	4,1
№2 (3)	5,9	6,1	5,5	6,1	6,25
№3 (4)	7,5	7,3	6,6	7,3	7,95
№4 (5)	8	7,9	7,3	7,5	8,3
№5 (6)	7,4	7,6	7	6,7	7,95

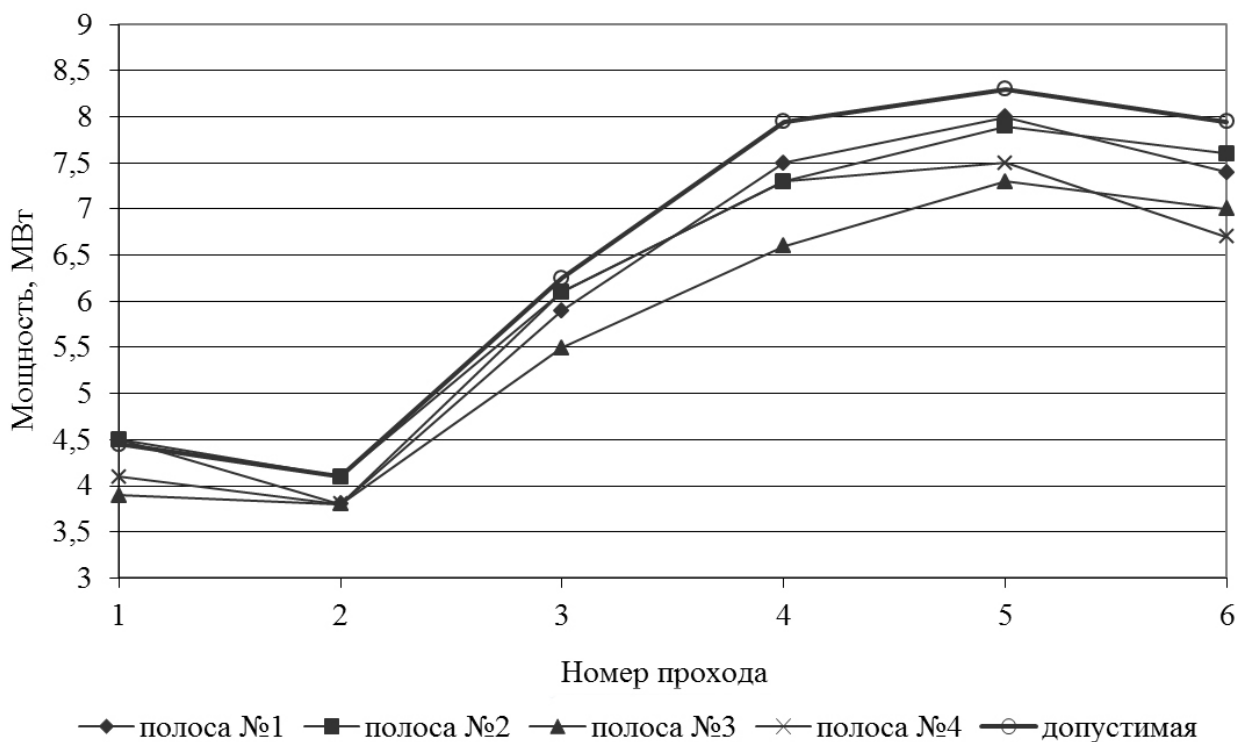


Рисунок 4.1 – Мощности двигателей черновых клетей

Из анализа полученных данных видно, что двигатель чернового горизонтального окалиноломателя имеет незначительную перегрузку при прокатке полос №1 и №2, а двигатель клетки №2 имеет почти предельную нагрузку во всех случаях.

Экспериментальные и допустимые усилия прокатки в чистовых клетях представлены в таблице 4.7 и на рисунке 4.2.

Таблица 4.7 – Усилия прокатки в чистовых клетях полос № 1- № 4

Клеть (номер прохода)	Усилия прокатки, МН				Р _{доп.} , МН
	полоса №1	Полоса №2	полоса №3	полоса №4	
№6 (1)	11,84	14,00	10,75	10,44	17,640
№7 (2)	20,84	22,33	19,42	17,12	19,208
№8 (3)	15,54	16,27	14,20	12,92	19,600
№9 (4)	14,16	14,47	13,02	11,36	14,700
№10 (5)	9,23	9,34	8,54	5,85	16,660
№11 (6)	10,22	10,57	9,69	5,68	14,700
№12 (7)	5,17	6,25	5,36	-	9,800

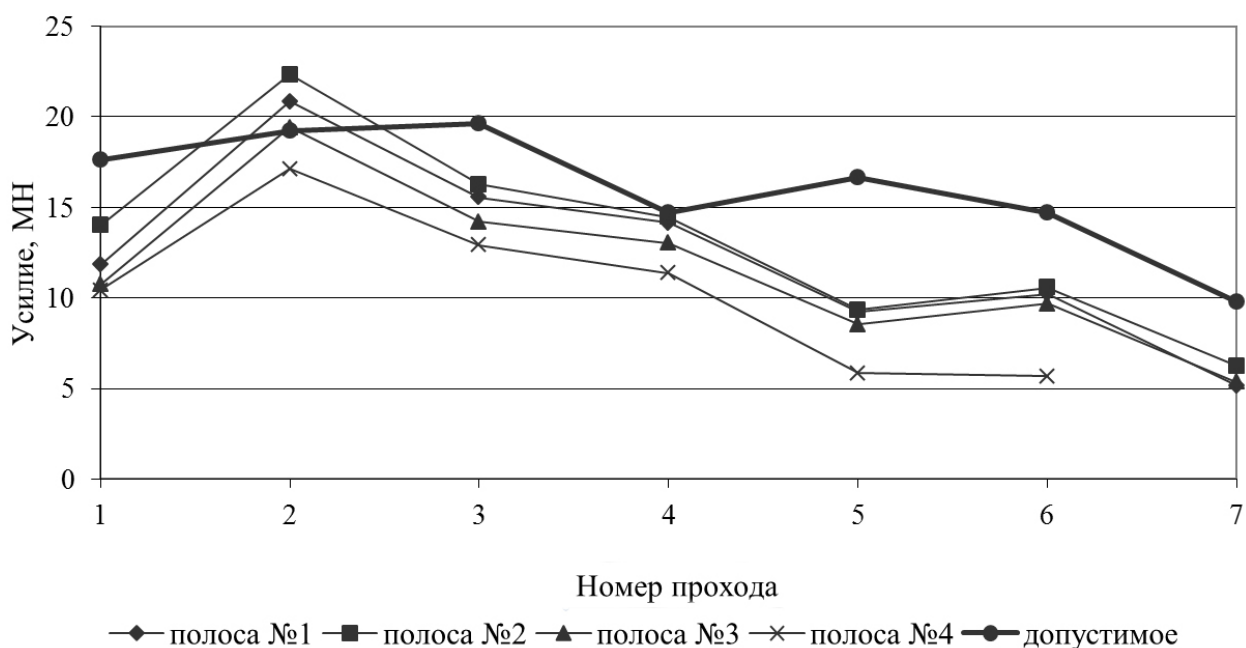


Рисунок 4.2 – Усилия прокатки в чистовых клетях

Из анализа усилий прокатки видно, что чистовая группа загружена нерационально, например: клеть №7 значительно перегружена почти во всех случаях. На пределе загрузка работает в клетях №9.

Требуется перераспределение обжатий по проходам с учетом возможностей оборудования чистовой группы.

Температурный режим прокатки в линии стана для исследованных полос приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Температурный режим прокатки в линии стана 1700

Номер полосы	Температуры в линии стана, °С			
	за клетью №5	перед клетью №6	конца прокатки	смотки
№1	1075	1031	874	615
№2	1093	1034	873	634
№3	1068	1034	871	633
№4	1039	1012	849	606
Требования по технологической инструкции	не менее 1050	не менее 980	840-860	600-650

Из таблицы 4.8 следует, что температурный режим не соблюдается за клетью №5 для полосы №4. Скорее всего, это связано с, недостаточным качеством нагрева слябов, обусловленного, например, колебанием калорийности топлива.

Клетки чистовой группы загружены не совсем рационально, имеет место перегрузка клетки №7.

Таким образом, в результате исследований обнаружены колебания калорийности топлива методических нагревательных печей, что ухудшает качество нагрева слябов, понижая пластичность, увеличивая сопротивление

деформации. В итоге перегружается оборудование стана, увеличивается расход энергии на прокатку, ухудшается качество готового листа.

Выявлены перегрузки некоторых рабочих клетей стана, что может быть предотвращено перераспределением обжатий по клетям стана, увеличением температуры нагрева слябов, что, однако, сопряжено с увеличением расхода топлива, металла с окалиной и т.д.

Учитывая обнаружившиеся резервы рабочих клетей и их приводов, в том числе при прокатке слябов с пониженной температурой представляется перспективной прокатка на стане с низкотемпературным нагревом слябов, практикуемым на ряде предприятий.

4.2 Алгоритм моделирования процесса деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС-1700

Алгоритм моделирования процесса прокатки на непрерывном широкополосном стане составлен на основе работ Коновалова Ю.В., Остапенко А.Л., Целикова А.И. [9-11]. Алгоритмом предусмотрен расчет процессов прокатки в клетях черновой и чистовой групп стана.

Алгоритм моделирования процесса прокатки в черновых клетях. В составе черновых групп клетей НШПС имеются универсальные клетки, в которых полоса одновременно деформируется в вертикальных и горизонтальных валках. Последовательную деформацию в черновых окалиноломателях с вертикальными и горизонтальными валками также можно рассматривать как прокатку в универсальной клетю. Такая деформация приводит к специфическому формоизменению металла: при обжатии боковых граней вертикальными валками развивается значительное приконтактное уширение – наплывы на широких гранях, обжатие которых при прокатке в горизонтальных валках вызывает интенсивное уширение металла, величину которого можно представить в виде:

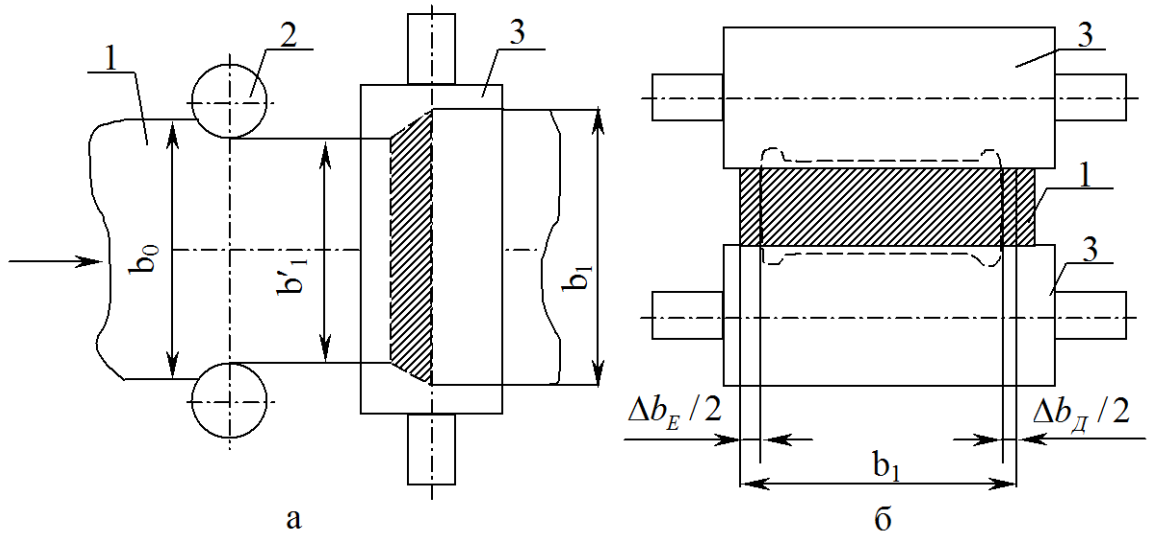
$$\Delta b = \Delta b_E + \Delta b_D, \quad (4.1)$$

где Δb_E – естественное уширение полосы в горизонтальных валках;
 Δb_D – дополнительное уширение (за счет обжатия утолщенных кромок полосы горизонтальными валками).

Тогда ширина полосы на выходе из универсальной клетки равна (рисунок 4.3):

$$b_1 = b_0 - \Delta b_B + \Delta b, \quad (4.2)$$

где b_0 – ширина на входе в вертикальные валки универсальной клетки;
 Δb_B – абсолютное обжатие полосы в вертикальных валках;



а – последовательная деформация полосы (1) в вертикальных (2) и горизонтальных (3) валках; б – деформация полосы с утолщенными кромками в горизонтальных валках.

Рисунок 4.3 – Схема к расчету уширения в универсальной клетке

Естественное уширение:

$$\Delta b_E = \Delta h \cdot e^{\left(0,21+0,68 \cdot \ln \frac{\Delta h}{h_0}-1,12 \cdot \ln \frac{b_0}{h_0}+0,47 \cdot \ln \frac{R}{h_0}\right)}, \quad (4.3)$$

где Δh – обжатие в горизонтальных валках;

h_0 – толщина полосы до пропуска;

R – радиус горизонтальных валков;

e – основание логарифма.

Дополнительное уширение:

$$\Delta b_D = \Delta b_B \cdot e^{\left(-1,77-0,25 \cdot \ln \frac{l_B}{h_1}+0,56 \cdot \ln \frac{b_0}{h_1}\right)}, \quad (4.4)$$

где $l_B = \sqrt{R_B \cdot \Delta b}$ – длина очага деформации при прокатке в вертикальных валках;

R_B – радиус вертикальных валков.

Время охлаждения переднего и заднего концов раската на межклетевых рольгангах:

$$\tau_{II} = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1} \left(\frac{1}{v_{II}} - \frac{1}{v_P} \right) + \frac{l_P}{v_P}; \quad (4.5)$$

$$\tau_3 = \left(l_P - \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1} \right) \frac{1}{v_P} + \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1 \cdot v_{II}}, \quad (4.6)$$

где h_0, b_0, l_0 – толщина, ширина и длина полосы до пропуска;
 h_1, b_1 – толщина и ширина раската после пропуска;
 l_P – длина рольганга;
 v_P, v_{II} – скорость рольганга и полосы.

Среднемассовая температура сляба на входе в первую клеть:

$$T_{0BX} = (0,987 - 0,123 \cdot \tau_{cl} / h_H) \cdot T_H + 96,85 \cdot \tau_{cl} / h_H, \quad (4.7)$$

где τ_{cl} – время транспортировки сляба от печи до первой клетки;
 h_H – начальная толщина сляба;
 T_H – температура нагрева сляба.

Среднемассовая температура раската на входе в последующие клетки:

$$T_0 = \left(A_6 - \frac{A_7 \tau_i}{h_1} \right) T_{0-1} + \frac{A_1 \tau_i}{h_1} + \left(A_2 - \frac{A_3 \tau_i}{h_1} \right) \frac{h_0}{h_1} + A_4 h_1 - A_5, \quad (4.8)$$

где τ_i – время охлаждения полосы после i -го прохода;
 T_{0-1} – температура металла в предыдущей клетке.

Температура полосы на выходе из клетки:

$$T_1 = A_6 \cdot T_{0-1} + A_2 \cdot h_0 / h_1 + A_4 \cdot h_1 - A_5. \quad (4.9)$$

Среднемассовая температура полосы за черновой группой, на входе в чистовую группу клетей:

$$T_K = (1 - 0,133 \cdot \tau_{TP} / h_1) \cdot T_1 + 98 \cdot \tau_{TP} / h_1, \quad (4.10)$$

где τ_{TP} – время транспортировки переднего конца полосы от последней клетки черновой группы до первой клетки чистовой группы.

Температура поверхности полосы на входе в чистовую группу клетей:

$$T_{пов} = 0,875 \cdot T_K + 101. \quad (4.11)$$

Сопротивление металла деформации при прокатке в горизонтальных валках:

$$\sigma_T = 99,1 \cdot [0,83 + 0,3 \cdot (C + Mn + Si)] \cdot \varepsilon^{0,229} \cdot u^{0,177} \cdot e^{-0,0024 T_0}, \quad (4.12)$$

где ε – относительное обжатие;
 u – скорость деформации;
 C, Mn, Si – содержание углерода, марганца, кремния в стали.

Относительное обжатие:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (4.13)$$

Скорость деформации:

$$u = \frac{v_{II} \cdot \Delta h}{l_D \cdot h_0}. \quad (4.14)$$

Усилие прокатки:

$$P = p_{CP} \cdot F, \quad (4.15)$$

где p_{CP} – среднее контактное давление;

F – площадь контакта металла с валками.

$$p_{CP} = 1,15 \cdot \sigma_T \cdot n_\sigma; \quad F = l_D \cdot b, \quad (4.16)$$

где n_σ – коэффициент напряженного состояния.

Коэффициент напряженного состояния:

$$n_\sigma = 0,674 + 0,213 \cdot \frac{l_D}{h_{CP}} \quad \text{при} \quad \frac{l_D}{h_{CP}} > 2; \quad (4.17)$$

$$n_\sigma = 0,5 \cdot \left(\frac{l_D}{h_{CP}} + \frac{h_{CP}}{l_D} \right) \quad \text{при} \quad \frac{l_D}{h_{CP}} \leq 2.$$

Момент прокатки в горизонтальных валках:

$$M_{ПР} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_D, \quad (4.18)$$

где ψ – коэффициент плеча равнодействующей усилия прокатки.

Коэффициент плеча равнодействующей:

$$\psi = 0,3 + 0,18 \cdot \left(\frac{h_{CP}}{l_D} \right). \quad (4.19)$$

Мощность прокатки:

$$N_{ПР} = M_{ПР} \cdot \pi \cdot n_{ДВ} / 30, \quad (4.20)$$

где $n_{дв}$ – частота вращения двигателя.

Сопротивление металла деформации при прокатке в вертикальных валках:

$$\sigma_T = 133 \cdot E^{0,252} \cdot u^{0,143} \cdot e^{-0,0025 \cdot T_0}. \quad (4.21)$$

Скорость деформации:

$$u = \frac{v_B \cdot l_B}{R \cdot (2 \cdot h_{III} + \Delta b)}, \quad (4.22)$$

где h_{III} – глубина проникновения пластической деформации со стороны одного вала.

$$h_{III} = 1,9 \cdot \frac{h_0}{2} - 0,33 \cdot \frac{h_0}{2 \cdot l_B}. \quad (4.23)$$

Усилие прокатки в вертикальных валках:

$$P = p_{CP} \cdot F, \quad (4.24)$$

где p_{CP} – среднее контактное давление;
 F – площадь контакта металла с валками.

$$p_{CP} = \sigma_T \cdot n_\sigma; \quad F = l_B \cdot b_{CP}, \quad (4.25)$$

где n_σ – коэффициент напряженного состояния;
 b_{CP} – средняя ширина зоны контакта металла с валками.

Коэффициент напряженного состояния:

$$n_\sigma = 1,1 + 0,44 \cdot \frac{h_0}{l_B}. \quad (4.26)$$

Средняя ширина зоны контакта:

$$b_{CP} = \frac{h_0 + 2 \cdot b_K}{2}; \quad 2 \cdot b_K = h_0 \cdot \left(\frac{h_{III}}{h_{III} + \frac{\Delta b}{2}} \right)^2, \quad (4.27)$$

Момент прокатки в вертикальных валках:

$$M_{IP} = P \cdot l_B \cdot \psi. \quad (4.28)$$

Мощность прокатки:

$$N_{\text{ПР}} = M_{\text{ПР}} \cdot \pi \cdot n_{\text{ДВ}} / 30. \quad (4.29)$$

Алгоритм моделирования процесса прокатки в чистовых клетях

Сопротивление металла деформации:

$$\sigma_T = S \cdot \sigma_{0Д} \cdot u^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot \left(\frac{T_0}{1000} \right)^c, \quad (4.30)$$

где S, a, b, c – константы, зависящие от марки стали.

Коэффициент трения:

$$f = K_{\text{П}} \cdot K_{\text{В}} \cdot (0,62 - 0,00025 \cdot T_0), \quad (4.31)$$

где $K_{\text{П}}$ и $K_{\text{В}}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние состояния поверхности валков и марку прокатываемой стали.

Показатель силы трения:

$$f_c = f \cdot \left[1 + 0,004 \cdot E - 0,005 \cdot (l_{\text{Д}} / h_{\text{СР}}) \right]. \quad (4.32)$$

Коэффициент напряженного состояния:

$$n_{\sigma} = 1 + f_c \cdot \left[0,5 + 0,34 \cdot \left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right)} \right] \text{ при } \left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right) > 1; \quad (4.33)$$

$$n_{\sigma} = 1 - \left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right) + 0,55 / \sqrt{\left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right)} + 0,5 \cdot \left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right) \text{ при } \left(\frac{l_{\text{Д}}}{h_{\text{СР}}} \right) \leq 1. \quad (4.34)$$

Коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на удельное давление:

$$n_{\text{В}} = 1, \text{ при } 0,5 < l_{\text{Д}} / h_{\text{СР}} < 2; \quad n_{\text{В}} = 1,15, \text{ при } l_{\text{Д}} / h_{\text{СР}} > 5. \quad (4.35)$$

Среднее давление металла на валки с учетом натяжения:

$$p_{\text{СР}} = n_{\sigma} \cdot n_{\text{В}} \cdot \sigma_T \left[1 - \frac{1}{\sigma_T} \cdot \left(\sigma_0 \cdot \frac{\delta}{\delta - 1} + \sigma_1 \cdot \frac{\delta}{\delta - 1} \right) \right], \quad (4.36)$$

где σ_0, σ_1 – переднее и заднее натяжение полосы.

$$\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l_D}{\Delta h}. \quad (4.37)$$

Усилие прокатки:

$$P = P_{CP} \cdot b_{CP} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (4.38)$$

Момент при непрерывной прокатке с натяжением:

$$M_{ПП} = (p_{CP} \cdot \ln \lambda + \sigma_0 + \sigma_1) \cdot F_1 \cdot R \cdot (1 + S), \quad (4.39)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения полосы после прохода;
 S – опережение.

Опережение с учетом натяжения:

$$S = \left(\frac{R}{h_1} - 0,5 \right) \cdot \frac{h_1^2}{R \cdot \Delta h} \cdot \left(\frac{h_H}{h_1} - 1 \right)^2; \quad (4.40)$$

$$\frac{h_H}{h_1} = e^{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \frac{\Delta h}{2 \cdot l_D}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{h_1}}; \quad \varepsilon_0 = \frac{1,15 \cdot \sigma_T - \sigma_0}{1,15 \cdot \sigma_T}; \quad \varepsilon_1 = \frac{1,15 \cdot \sigma_T - \sigma_1}{1,15 \cdot \sigma_T}. \quad (4.41)$$

Скорость прокатки с учетом опережения:

$$v_{ПП} = \frac{h_0}{h_1} \cdot v_B \cdot (1 + S), \quad (4.42)$$

где v_B – скорость валков.

Изменение температуры металла за счет излучения:

$$\Delta T_H = \frac{(T_0 - 400) \cdot \tau_i}{16 \cdot h_1}. \quad (4.43)$$

Потери тепла конвекцией приняты равными (10-20)% от потерь тепла излучением.

Изменение температуры за счет отдачи тепла рабочим валкам:

$$\Delta T_B = \frac{4,87}{h_0 + h_1} \cdot (T_0 - T_B) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot l_D \cdot h_0}{10^3 \cdot (h_0 + h_1) \cdot v_{П}}}, \quad (4.44)$$

где T_B – температура поверхности валков.

Потери тепла на гидросбиве чистового окалиноломателя:

$$\Delta t_{\Gamma} = 500 \cdot n / (h_1 \cdot v_{II}), \quad (4.45)$$

где n – число секций гидросбива.

Повышение температуры за счет энергии деформации металла:

$$\Delta T_{\Delta} = \frac{1325 - T_0}{8,35} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{l_{\Delta}}{h_{CP}} - 1 \right) \right] \cdot \lg \frac{h_0}{h_1}, \quad (4.46)$$

где $h_{CP} = (h_0 + h_1) / 2$ – средняя толщина полосы;

$l_{\Delta} = \sqrt{R \cdot \Delta h}$ – длина очага деформации при прокатке в горизонтальных валках.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений усилий и мощностей прокатки учитывали коэффициентами:

$$K_P = \frac{P_{\Delta}}{P_P}; \quad (4.47)$$

$$K_N = \frac{N_{\Delta}}{N_P}. \quad (4.48)$$

4.3 Моделирование процесса деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС-1700

Программа, реализующая приведенный алгоритм, составлена на языке «Basic» и включает блоки формирования исходных данных, расчета температурных, скоростных, энергосиловых параметров прокатки в клетях черновой и чистовой групп стана.

Тестирование программы выполнили путем сравнения расчетных (индекс «Р») и экспериментальных (индекс «Э») значений усилий (P_P , P_{Δ}) и мощностей (N_P , N_{Δ}), измеренных на НШПС 1700 АО «АрселорМиттал Темиртау», при прокатке непрерывнолитых слябов 200×905 мм в полосы 2,4×875 мм (сталь 08Ю) и катаных слябов 175×1020 мм в полосы 2×1000 мм (сталь 17ГС). Расчетные и экспериментальные режимы прокатки слябов были идентичными.

Для черновых клетей имелась возможность экспериментального измерения мощности прокатки (с помощью мегаваттметра, диапазон измерений от 0 до 12 МВт, класс точности 1,5), для чистовых клетей – усилия прокатки (с помощью месдоз фирмы «Kelk»). Расчетные и экспериментальные значения параметров прокатки указаны в таблицах 4.9-4.12.

Таблица 4.9 – Параметры прокатки непрерывнолитых слябов 200×905 мм, сталь 08Ю, в полосы 2,4×875 мм в горизонтальных валках клетей черновой группы

Клеть	Δh , мм	b_0 , мм	T_0 , °C	P_{CP} , МПа	P_P , МН	$M_{ГПР}$, МН·м	N_P , МВт	$N_{Э}$, МВт
1	-	905	1231	-	-	-	-	-
2	25	875	1226	50,93	5,34	0,75	1,30	2,27
3	40	891	1223	60,77	7,66	1,08	3,62	2,60
4	25	896	1226	66,61	6,50	0,71	3,18	4,29
5	30	894	1221	83,28	8,89	0,94	5,27	3,93
6	25	896	1226	106,81	10,43	0,94	6,18	5,62
7	17	898	1209	134,26	10,84	0,77	5,06	3,61

Примечание: клетки 1 и 2 – вертикальный и горизонтальный окалиноломатели соответственно.

Таблица 4.10 – Параметры прокатки непрерывнолитых слябов 200×905 мм, сталь 08Ю, в полосы 2,4×875 мм в горизонтальных валках клетей чистовой группы

Клеть	Δh , мм	T_0 , °C	P_{CP} , МПа	P_P , МН	$P_{Э}$, МН	$M_{ГПР}$, МН·м	N_P , МВт
1	2	993	42,79	1,83	-	0,02	0,13
2	12	956	93,07	10,60	13,26	0,31	3,03
3	11	954	135,70	14,87	13,72	0,38	5,99
4	4,80	959	148,64	10,66	13,29	0,19	3,76
5	2,60	956	172,22	9,09	10,89	0,12	3,38
6	1,20	949	160,34	5,75	9,70	0,05	1,79
7	1,10	936	228,53	7,85	10,48	0,06	2,66
8	0,60	924	255,46	6,48	6,50	0,05	2,78

Примечание: клеть 1 – чистовой горизонтальный окалиноломатель.

Таблица 4.11 – Параметры прокатки непрерывнолитых слябов 175×1020 мм, сталь 17ГС, в полосы 2×1000 мм в горизонтальных валках клетей черновой группы

Клеть	Δh , мм	b_0 , мм	T_0 , °C	P_{CP} , МПа	P_P , МН	$M_{ГПР}$, МН·м	N_P , МВт
1	-	1020	1239	-	-	-	-
2	25	1000	1233	51,74	6,20	0,81	1,41
3	30	1013	1227	61,27	7,60	0,93	3,12
4	30	1015	1231	72,04	8,73	0,96	4,26
5	25	1017	1224	86,83	9,62	0,90	5,03
6	20	1019	1229	110,33	10,95	0,86	5,67
7	15	1020	1208	124,83	10,75	0,69	4,56

Таблица 4.12 – Параметры прокатки непрерывнолитых слябов 175×1020 мм, сталь 17ГС, в полосы 2×1000 мм в горизонтальных валках клетей чистовой группы

Клеть	Δh , мм	T_0 , °C	p_{CP} , МПа	P_P , МН	$P_{Э}$, МН	$M_{ГР}$, МН·м	N_P , МВт
1	2	973	39,68	1,94	-	0,02	0,13
2	12,88	926	126,25	16,95	16,52	0,47	4,68
3	5,95	929	146,94	13,41	12,81	0,26	4,11
4	3,92	928	227,60	16,86	15,44	0,26	5,24
5	1,13	927	154,04	6,13	7,20	0,05	1,54
6	0,94	912	185,52	6,73	7,84	0,05	1,87
7	0,78	897	247,57	8,18	9,52	0,06	2,35
8	0,35	882	195,48	4,33	5,98	0,03	1,66

Расхождение расчетных и экспериментальных значений усилий и мощностей прокатки учитывали коэффициентами K_N и K_P представленными в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Коэффициенты K_N и K_P для клетей черновой и чистовой групп стана

Черновая группа (сталь 08Ю)							
Клеть	1	2	3	4	5	6	
K_N	-	0,72	1,35	0,75	0,91	0,71	
Чистовая группа (сталь 08Ю/сталь 17ГС)							
Клеть	1	2	3	4	5	6	7
K_P	1,25/0,97	0,93/0,96	1,25/0,92	1,2/1,18	1,6/1,16	1,34/1,16	1/1,38

Таблица 4.14 – Обжатия и скорости прокатки непрерывнолитых слябов в полосы 5×800 мм; 5×1000 мм; 5×1500 мм

Величина	Клеть черновой группы						
	1	2	3	4	5	6	
h_0 , мм	200	175	145	115	85	63	
h_1 , мм	175	145	115	85	63	43	
Δh , мм	25	30	30	30	22	20	
ε	0,125	0,171	0,207	0,261	0,259	0,317	
$v_{ГР}$, м/с	1	1,68	2,12	2,66	3,14	3,14	
Величина	Клеть чистовой группы						
	1	2	3	4	5	6	7
h_0 , мм	41	31	23	17	13	11	10,5
h_1 , мм	31	23	17	13	11	10,5	10
Δh , мм	10	8	6	4	2	0,5	0,5
ε	0,244	0,258	0,261	0,235	0,154	0,045	0,048
$v_{ГР}$, м/с	3,46	5,5	6,94	9,85	12	14,6	18,2

С использованием компьютерной программы выполнены расчеты параметров прокатки на НШПС 1700 непрерывнолитых слябов (сталь 17ГС): 200×820 мм в полосы 5×800 мм; 200×1020 мм в полосы 5×1000 мм; 200×1520 мм в полосы 5×1500 мм. Температура нагрева слябов $T_0=1270^{\circ}\text{C}$, обжатия в горизонтальных валках черновых и чистовых клетей (табл. 4.14), зазоры между вертикальными валками окалиноломателя и универсальных черновых клетей, другие исходные данные приняты с учетом требований действующей цеховой технологической инструкции.

Результаты расчетов усилий и мощности прокатки в клетях черновой и чистовой групп стана представлены на рис. 4.4-4.7 (где «b» - ширина слябов).

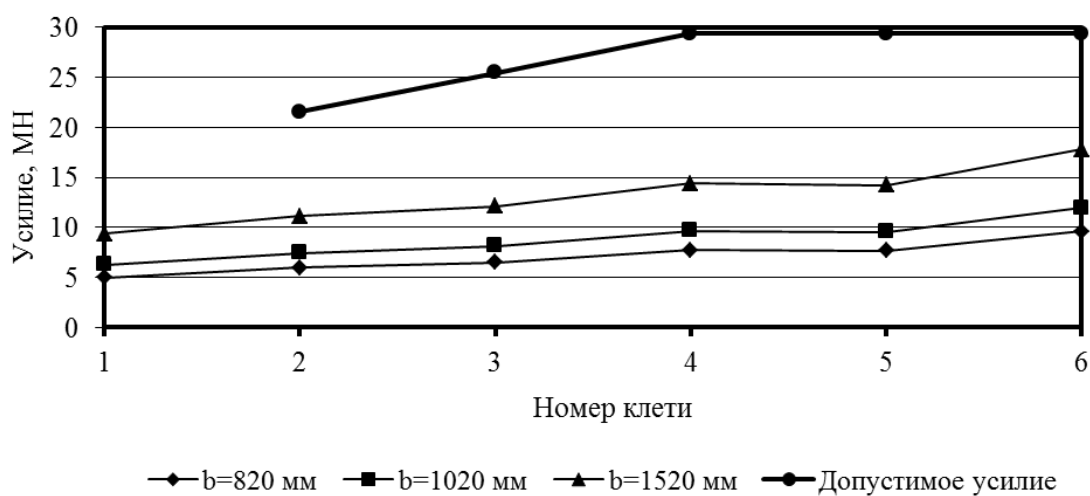


Рисунок 4.4 – Усилия прокатки в клетях черновой группы стана

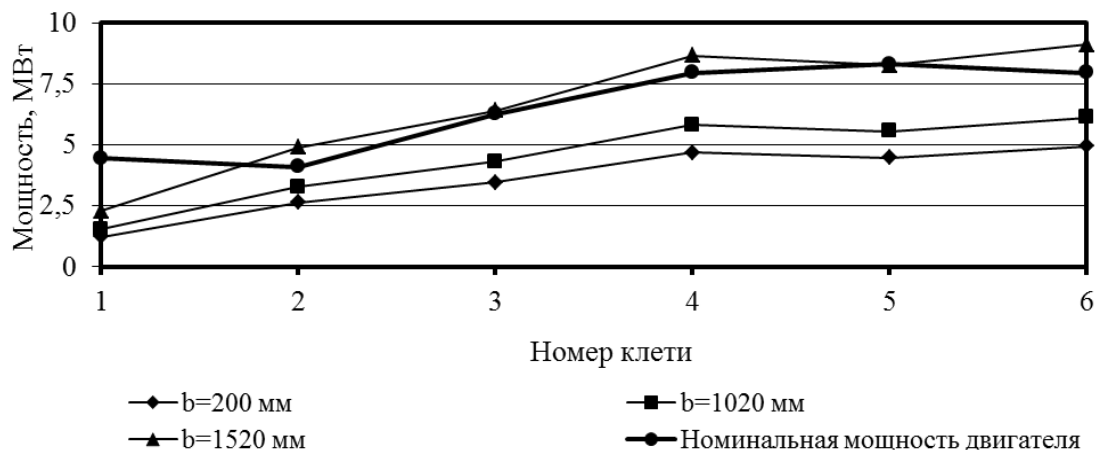


Рисунок 4.5 – Мощности прокатки в клетях черновой группы стана

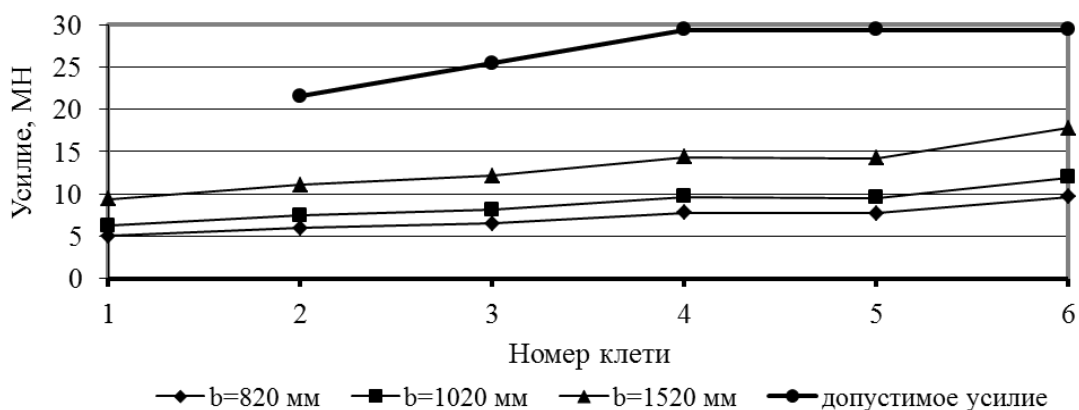


Рисунок 4.6 – Усилия прокатки в клетях чистовой группы стана

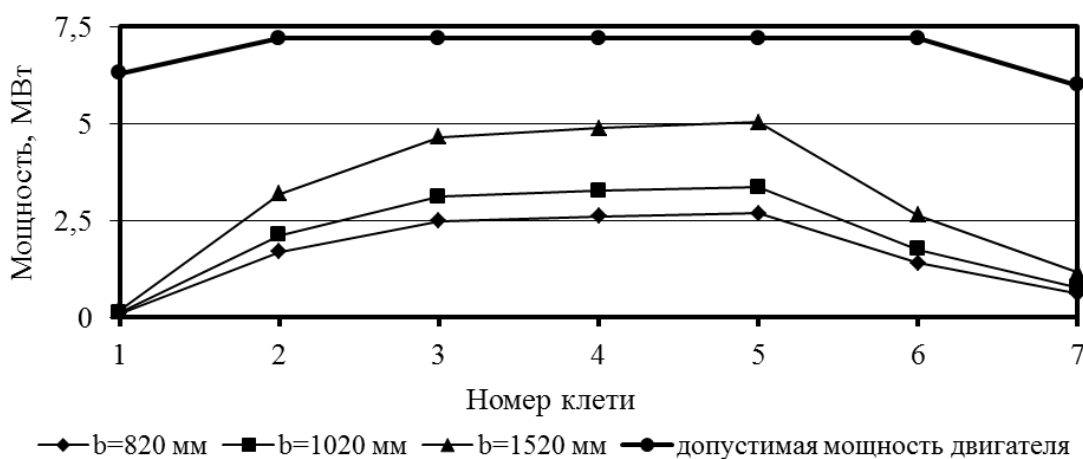


Рисунок 4.7 – Мощности прокатки в клетях чистовой группы стана

Из рисунков 4.4-4.7 следует, что усилия прокатки во всех клетях обеих групп стана не превышают допустимых. При этом некоторое превышение расчетной мощности прокатки над экспериментальной в клетях №2, №4, №6 черновой группы при прокатке широких полос свидетельствует о необходимости корректировки режимов прокатки.

Разработаны алгоритм и компьютерная программа расчета параметров горячей прокатки на широкополосных станах. Тестирование программы выполнено с использованием экспериментальных данных о прокатке на НШПС 1700 слябов 200×905 мм в полосы 2,4×875 мм; 175×1020 мм в полосы 2×1000 мм. Выполнено моделирование прокатки непрерывнолитых слябов, результаты которого позволили оценить загрузку механического оборудования стана и приводных двигателей рабочих клетей.

4.4 Моделирование процесса деформирования непрерывнолитых слябов на НШПС 1700 в условиях низкотемпературного нагрева

Улучшенное качество, высокая пластичность непрерывнолитых слябов создают потенциальную возможность различного усовершенствования технологии производства широких горячекатаных полос. Одно из важнейших усовершенствований связано с низкотемпературным нагревом слябов перед прокаткой. По данным фирм «СинНиппон Сэйтэцу», Япония и «Davy McKee», Великобритания, установлено, что при понижении температуры нагрева на 10°C экономия топлива может составлять 16%. С понижением температуры нагрева снижают температуру печи в зонах подачи топлива, что улучшает условия ее работы: уменьшаются образования вредных выбросов NO_x и потери металла от окисления, предотвращается образование вязкой окалины и жидкого шлака, облегчается удаление шлака (окалины) из печи; увеличивается срок службы элементов печи, сокращается число ее остановок на ремонты, что способствует уменьшению затрат топлива на последующие разогревы.

Одним из наиболее важных моментов повышения эффективности производства на переделе сляб-полоса является вопрос экономии топлива при нагреве слябов в методических печах. Величина расхода топлива является одной из основных статей, входящих в себестоимость прокатной продукции.

На АО «АрселорМиттал Темиртау» были измерены технологические параметры нагрева и прокатки на НШПС-1700 опытных партий непрерывнолитого металла. Фиксировались температура нагрева, время нагрева, расход газа и мазута. Анализ экспериментальных данных показал, что при снижении температуры нагрева металла на 10°C время нагрева и расход газа уменьшаются на 13,66% и 0,99% соответственно.

На основании анализа зарубежных источников и опыта работы АО «АрселорМиттал Темиртау» в условиях дестабилизации газоснабжения нагревательных устройств, возможно снижать температуру выдачи слябов рядового сортамента в зависимости от толщины слябов на 10-30°C.

Моделирование выполним на ЭВМ. Зазоры в вертикальных валках устанавливаются согласно технологической инструкции (ТИ) и зависят от номинальной ширины прокатываемого листа. Параметры прокатки в вертикальных валках не приводятся, так как они не оказывают существенного влияния на процесс прокатки.

В качестве объекта моделирования используем процесс прокатки слябов марки Зсп, сечением 200×1530 мм в полосу 6×1500 мм. Примем температуру нагрева слябов – 1270°C, что на 10°C меньше требований технологической инструкции. Предлагаемый режим обжатий и скорости прокатки в клетях черновой и чистовой групп стана 1700 представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Обжатия и скорости прокатки в горизонтальных валках непрерывнолитых слябов 200×1530 мм в полосы 6×1500 мм

Величина	Клетки черновой группы						
	ГО	№1	№2	№3	№4	№5	
h_0 , мм	200	165	125	95	70	55	
h_1 , мм	165	125	95	70	55	42	
Δh , мм	35	40	30	25	15	13	
ε	0,18	0,24	0,24	0,26	0,21	0,24	
v_{IP} , м/с	1	1	1,68	2,12	2,66	3,14	
Величина	Клетки чистовой группы						
	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
h_0 , мм	40	29	19,57	13,85	10,18	8,38	6,66
h_1 , мм	29	19,57	13,85	10,18	8,38	6,66	6
Δh , мм	11	9,43	5,72	3,67	1,80	1,72	0,66
ε	0,28	0,33	0,29	0,26	0,18	0,21	0,10
v_3 , м/с	0,78	1,28	1,81	2,48	3,04	3,87	4,33
v_{IP} , м/с	1,01	1,58	2,22	2,99	3,62	4,54	5,01

Расчетные параметры температурного и энергосилового режимов прокатки в горизонтальных валках черновой группы представлены в таблицах 4.16-4.18 и на рисунке 4.8.

Таблица 4.16 – Температурный режим прокатки в валках черновой группы

Клеть (номер прохода)	t_0 , °C	$\Delta t_{И}$, °C	$\Delta t_{К}$, °C	$\Delta t_{В}$, °C	$\Delta t_{Д}$, °C	$\Delta t_{Г}$, °C	t_1 , °C
1	2	3	4	5	6	7	8
ГО (1)	1234,74	2,66	0,53	17,75	0,84	9,51	1205,12
№1 (2)	1205,12	3,25	0,65	18,02	1,72	-	1184,92
№2 (3)	1184,92	4,62	0,92	18,12	2,06	6,02	1156,92
№3 (4)	1156,92	7,87	1,57	18,39	2,96	4,88	1126,91
№4 (5)	1126,91	14,24	2,85	18,33	2,78	3,71	1090,36
№5 (6)	1090,36	21,48	4,30	18,69	3,97	3,21	1046,53

Как видно из табл. 4.16, температура прокатки в черновой группе за клетью №5, равная 1047⁰С, удовлетворяет цеховым требованиям (по ТИ – не менее 1050⁰С).

Таблица 4.17 – Энергосиловые параметры прокатки в валках черновой группы

Клеть (номер прохода)	σ , МПа	p_{CP} , МПа	P , МН	$P_{доп}$, МН	$M_{ГР}$, МН·м	$M_{ДВ}$, МН·м	$N_{ДВ}$, МВт
ГО (1)	56,29	66,80	14,22	-	2,14	0,11	4,25
№1 (2)	65,86	75,76	16,29	21,56	2,23	0,13	3,58
№2 (3)	74,65	86,14	15,66	25,48	1,74	0,16	6,03
№3 (4)	84,82	101,35	16,82	29,40	1,60	0,19	7,44
№4 (5)	90,68	109,03	14,03	29,40	1,03	0,15	6,50
№5 (6)	104,49	134,42	16,12	29,40	1,04	0,18	6,43

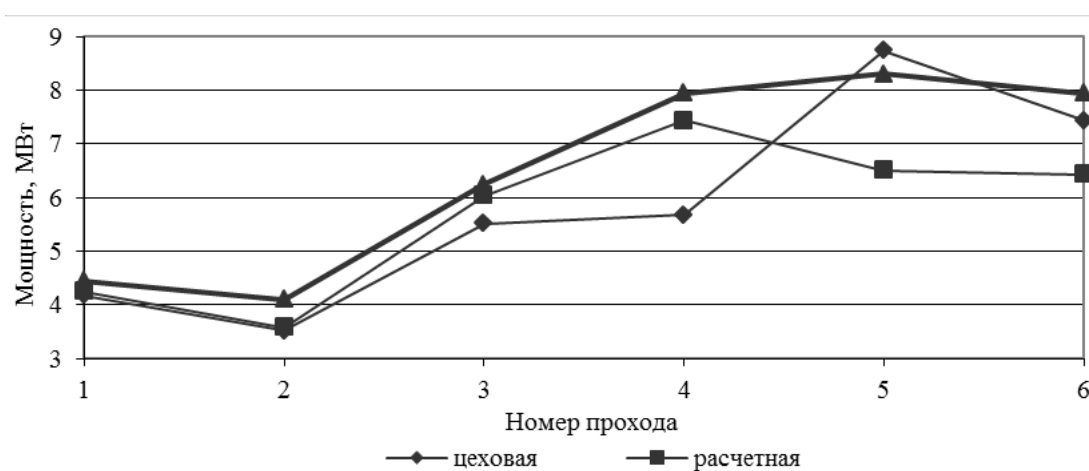


Рисунок 4.8 – Мощности на валу двигателей горизонтальных валков черновой группы

Как видно из таблицы 4.17 и рисунка 4.8, цеховой режим обжатий характеризуется превышением мощности на валу двигателя клетки №4, предлагаемый режим обжатий превышения допустимого усилия прокатки и перегрузки главных двигателей клетей не вызывает. В последних клетях черновой группы имеется возможность увеличения обжатий.

Таблица 4.18 – Составляющие момента двигателя $M_{ДВ}$ клетей черновой группы

Клеть (номер прохода)	$M_{ГР1}$, МН·м	$M_{ГР2}$, МН·м	$M_{ГР}$, МН·м	$M_{дин}$, МН·м	$M_{ХХ}$, МН·м
ГО (1)	0,037	0,242	0,279	0,03	0,006
№1 (2)	0,031	0,251	0,283	0,03	0,005
№2 (3)	0,028	0,197	0,225	0,03	0,007
№3 (4)	0,030	0,181	0,212	0,03	0,009
№4 (5)	0,025	0,117	0,142	0,03	0,009
№5 (6)	0,029	0,119	0,148	0,03	0,009

Параметры температурного и энергосилового режимов прокатки в чистовой группе НШПС 1700 представлены в таблицах 4.19-4.21 и на рисунке 4.9.

Таблица 4.19 – Температурный режим прокатки в клетях чистовой группы

Клеть (номер прохода)	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{и}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$
№6 (1)	977,13	6,94	19,71	7,37	957,85
№7 (2)	957,85	5,64	20,78	10,93	942,37
№8 (3)	942,37	5,74	20,72	10,73	926,64
№9 (4)	926,64	5,75	20,68	10,59	910,80
№10 (5)	910,80	6,19	19,47	6,57	891,71
№11 (6)	891,71	5,69	20,22	9,08	874,89
№12 (7)	874,89	6,18	18,58	3,58	853,72

Как видно из таблицы 4.19, температура подката перед чистовой группой, равная 977°C (по ТИ – не менее 980°C) и температура конца прокатки в чистовой группе, равная 854°C (по ТИ – $840\text{-}860^\circ\text{C}$), удовлетворяет температурным требованиям прокатки в чистовой группе стана.

Таблица 4.20 – Энергосиловые параметры прокатки в клетях чистовой группы

Клеть (номер прохода)	$\sigma, \text{МПа}$	$p_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$P, \text{МН}$	$M_{\text{пр}}, \text{МН}\cdot\text{м}$	$M_{\text{дв}}, \text{МН}\cdot\text{м}$	$N_{\text{дв}}, \text{МВт}$
№6 (1)	53,07	78,21	14,56	0,40	1,29	5,06
№7 (2)	62,93	100,92	17,39	0,44	1,13	6,84
№8 (3)	68,46	114,93	15,43	0,31	0,76	6,76
№9 (4)	74,23	130,72	14,06	0,23	0,62	7,67
№10 (5)	73,89	121,68	9,16	0,10	0,39	6,12
№11 (6)	84,14	138,28	10,18	0,09	0,24	5,09
№12 (7)	76,89	112,74	5,14	0,07	0,21	4,37

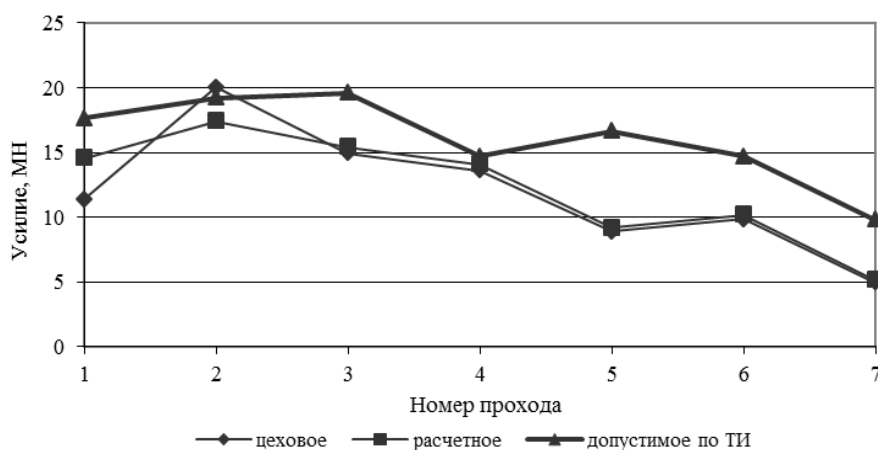


Рисунок 4.9 – Усилия прокатки в клетях чистовой группы

Как видно из таблицы 4.20 и рисунка 4.9, по цеховому режиму наблюдается превышение усилия в клетях №8. Расчетные усилия прокатки, моменты и мощности на валу двигателей в клетях чистовой группы перегрузки не вызывают. В чистовой группе также имеются некоторые резервы по увеличению ее обжимной способности.

Таблица 4.21 – Составляющие момента двигателя $M_{дв}$ клетей чистовой группы

Клеть	$M_{ГР1},$ МН·м	$M_{ГР2},$ МН·м	$M_{ГР},$ МН·м	$M_{дин},$ МН·м	$M_{ХХ},$ МН·м
№6 (1)	0,026	0,048	0,07	0,73	0,08
№7 (2)	0,031	0,052	0,08	0,54	0,06
№8 (3)	0,027	0,037	0,06	0,34	0,04
№9 (4)	0,025	0,028	0,05	0,31	0,03
№10 (5)	0,016	0,013	0,03	0,23	0,02
№11 (6)	0,018	0,012	0,03	0,10	0,02
№12 (7)	0,009	0,009	0,02	0,10	0,02

Нагрузочный режим работы двигателей чистовой группы представлен в таблице 4.22 и на рисунках 4.10-4.16.

Таблица 4.22 – Нагрузочный режим работы двигателей клетей чистовой группы

Клеть	$M_A,$ МН·м	$M_B,$ МН·м	$M_B,$ МН·м	$M_G,$ МН·м	$M_D,$ МН·м	$M_E,$ МН·м	$M_Ж,$ МН·м	$M_{ЭКВ},$ МН·м	$M_H,$ МН·м
№6 (1)	0,08	0,53	1,26	1,63	0,68	-0,84	-0,65	0,56	1,61
№7 (2)	0,06	0,55	1,09	1,35	0,68	-0,60	-0,48	0,58	1,19
№8 (3)	0,04	0,39	0,74	0,90	0,48	-0,37	-0,30	0,41	0,81
№9 (4)	0,03	0,29	0,60	0,73	0,35	-0,34	-0,28	0,30	0,58
№10 (5)	0,02	0,15	0,38	0,45	0,18	-0,25	-0,21	0,14	0,46
№11 (6)	0,02	0,13	0,24	0,28	0,15	-0,10	-0,09	0,13	0,34
№12 (7)	0,02	0,10	0,20	0,24	0,12	-0,10	-0,09	0,10	0,34

Из таблицы 4.22 видно, что двигатели работают без перегрева, т.к. $M_{ЭКВ} \leq M_H$, и без перегрузки, т.к. $M_{МАХ} \leq M_H \cdot K$, где K – коэффициент перегрузки, равный 2,5 в каждом проходе.

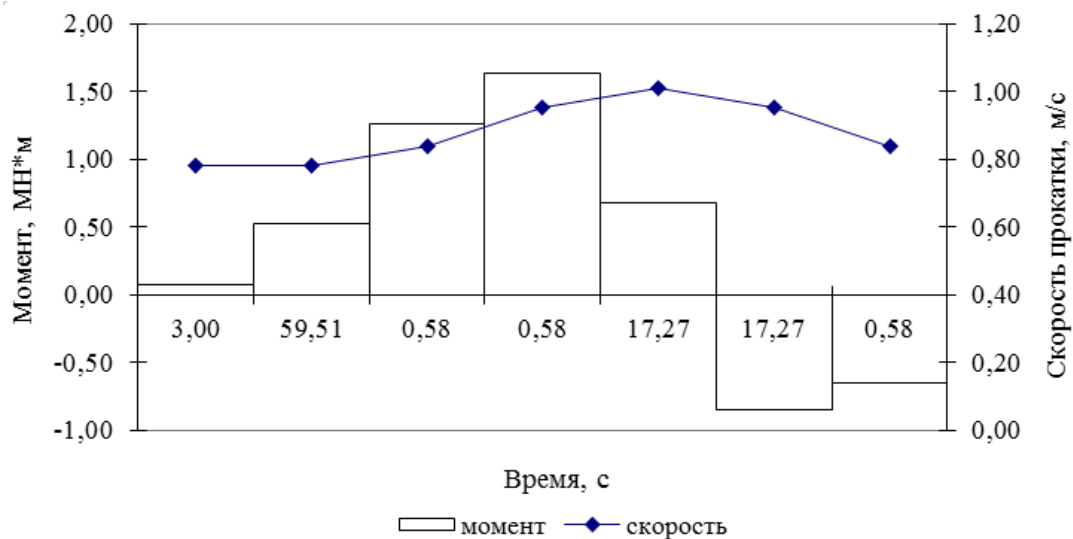


Рисунок 4.10 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №6 чистой группы

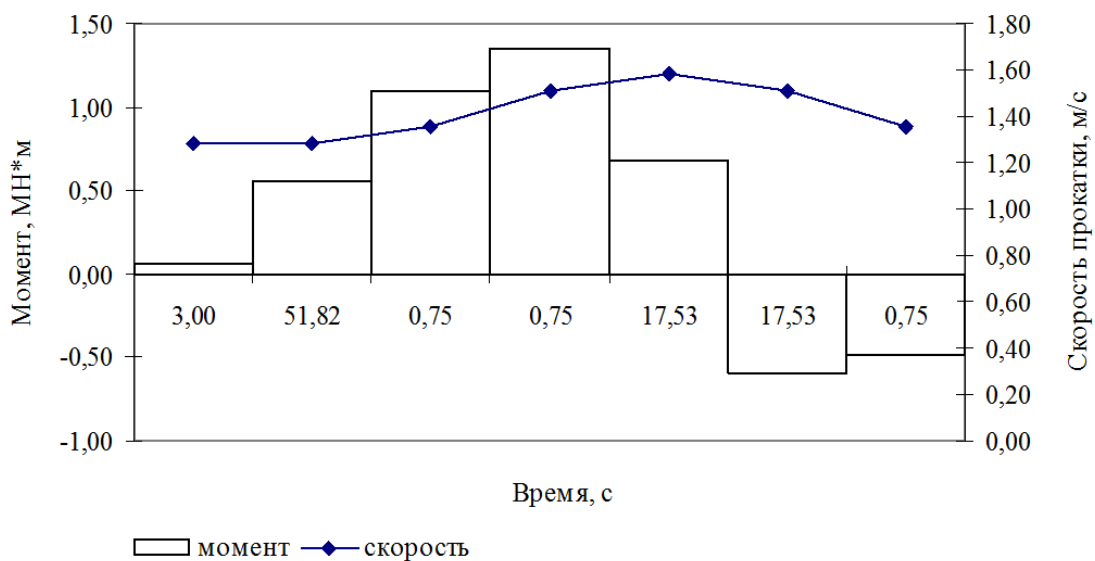
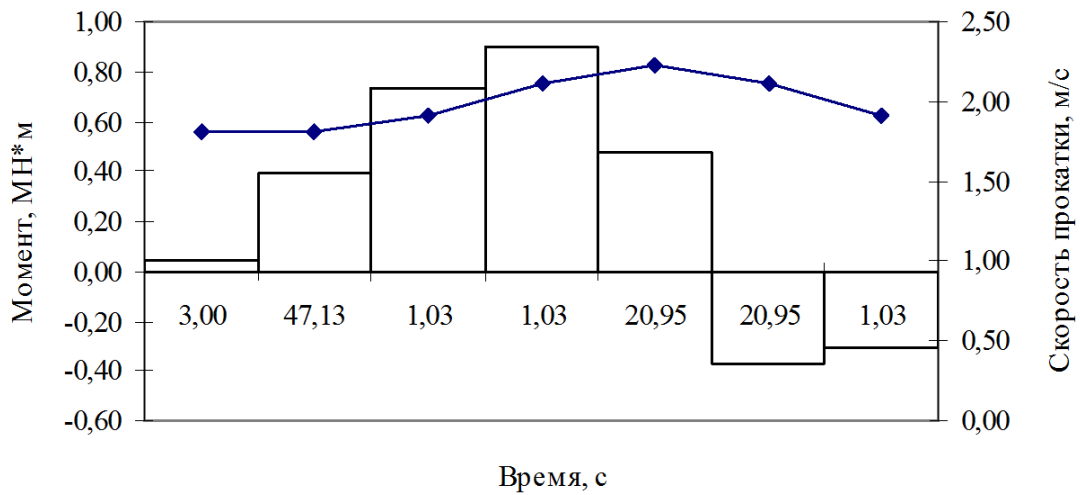
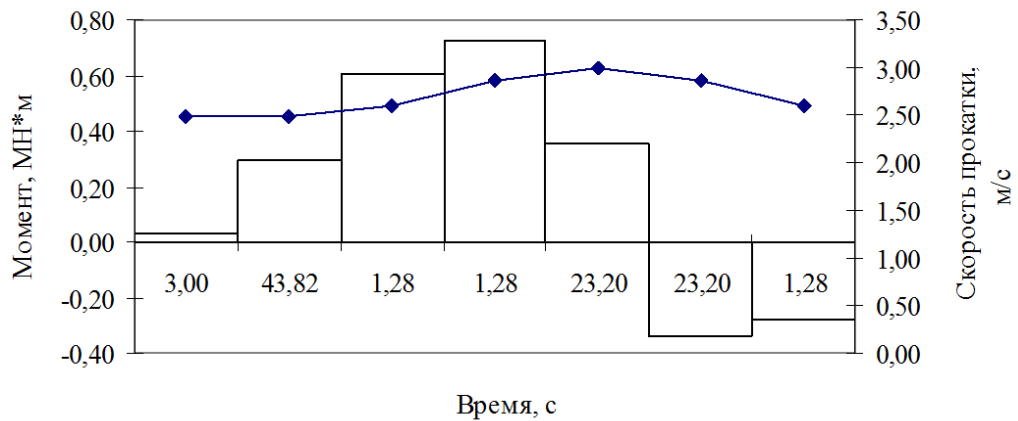


Рисунок 4.11 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №7 чистой группы



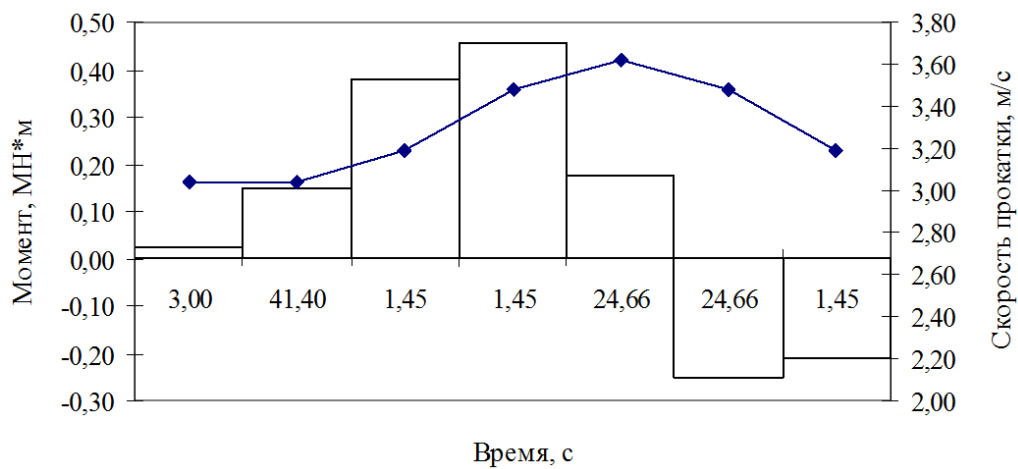
□ момент ◆ скорость

Рисунок 4.12 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №8 чистой группы



□ момент ◆ скорость

Рисунок 4.13 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №9 чистой группы



□ момент ◆ скорость

Рисунок 4.14 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №10 чистой группы

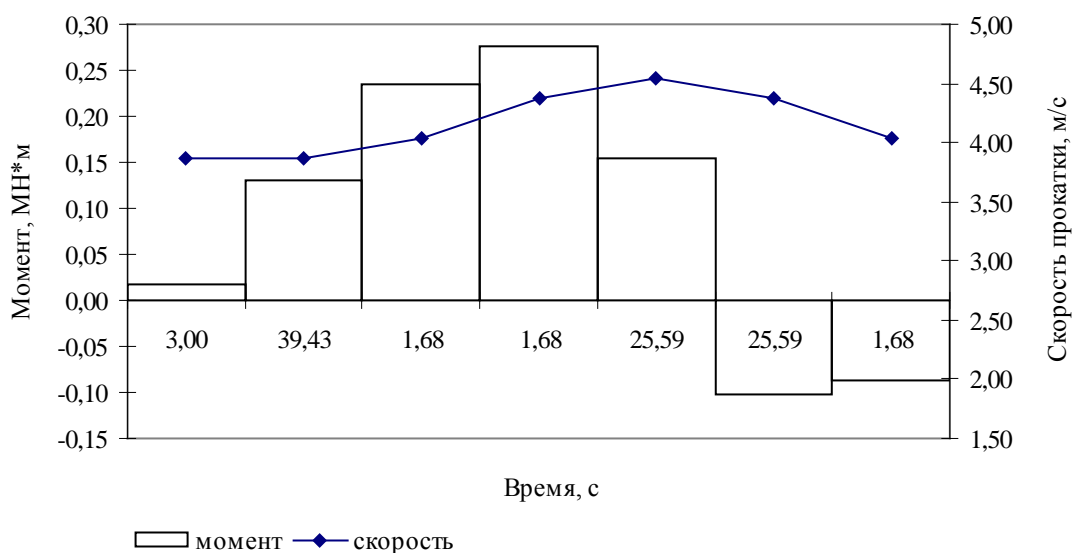


Рисунок 4.15 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №11 чистовой группы

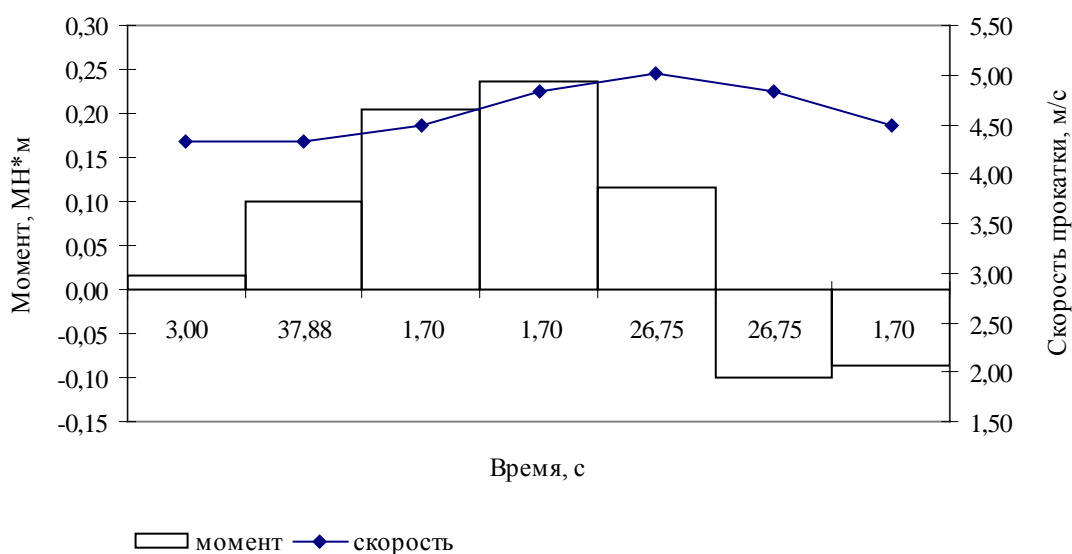


Рисунок 4.16 – Скоростная и нагрузочная диаграмма двигателя клетки №12 чистовой группы

Таким образом, компьютерное моделирование процесса деформирования на НШПС-1700 непрерывнолитых слябов сечением 200x1530 мм, сталь 3сп, нагретых в методической печи до 1270⁰С (т.е. на 10⁰С меньше требуемой по технологической инструкции) в полосы сечением 6x1500мм, показало, что температурный режим прокатки по клетям черновой и чистовой групп стана соответствует цеховым требованиям.

При этом усилия, моменты и мощности на валу двигателей не превышают допустимых значений. Двигатели работают без перегрева и перегрузки.

5 Исследование характеристик механических свойств горячекатаного металла на НШПС-1700

5.1 НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау»

Непрерывный широкополосный стан горячей прокатки НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау» относится к широкополосным станам второго поколения, построен в 1968 г, последний раз модернизирован в 2010 г. Оборудование стана входит в состав листопрокатного цеха №1 (ЛПЦ-1).

В состав НШПС-1700 входят: участок загрузки, участок нагревательных печей, черновая и чистовая группа клетей, а также уборочная линия стана.

Участок загрузки состоит из загрузочного рольганга, подъемных столов со сталкивателями и передаточных тележек.

Участок нагревательных печей состоит из загрузочного рольганга перед каждой печью, сдвоенных толкателей, четырех пятизонных методических печей с торцевой посадкой и выдачей и приемного рольганга.

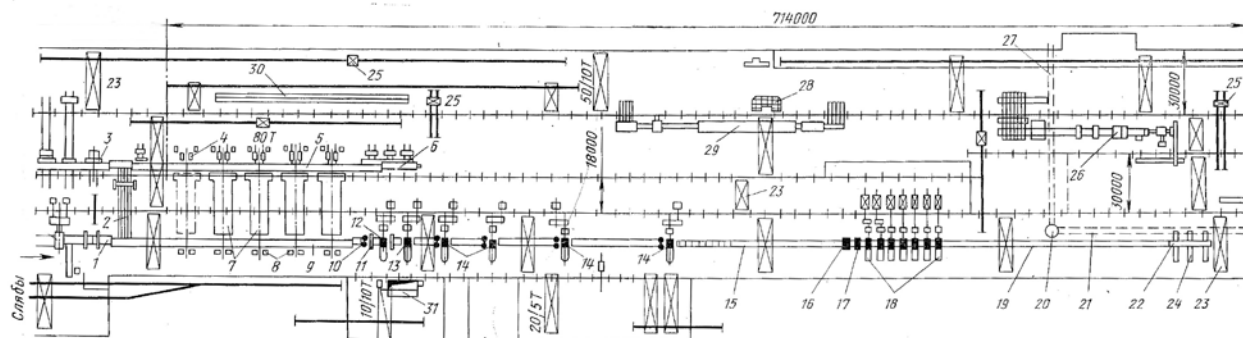
Черновая группа клетей состоит из последовательно расположенных вертикального и горизонтального окалиноломателей, первой рабочей клетки «кварто» и четырех рабочих универсальных клетей «кварто» №2-№5 с вертикальными валками диаметром 1000 мм – эджерами. Длина бочки валков всех черновых клетей 1700 мм; диаметр рабочих валков черновых клетей 950 мм. Удаление окалины с поверхности раската осуществляется гиробивом при давлении воды до 12 МПа.

Чистовая группа клетей состоит из: промежуточного рольганга с устройством разделки недокатов, летучих ножниц, чистового окалиноломателя «дуо» и семи клетей «кварто» №6-№12. Длина бочки валков всех чистовых клетей 1700 мм, диаметр рабочих валков чистовых клетей 700 мм.

Все клетки имеют индивидуальный привод от электродвигателей, мощность которых для одной группы равна 26 000 кВт.

Уборочная линия стана состоит из: отводящего рольганга №1 с душирующими устройствами, тянущих роликов, первой группы моталок (№1-№3) для смотки тонких (4,0 мм и менее) полос, отводящего рольганга №2 и второй группы моталок (№4-№5) для смотки толстых полос – более 4,0 мм, тележек-съемников, обвязочных машин «Signode» (первая группа моталок), кантователей, приемников и конвейеров рулонов с подъемно-поворотными столами.

На рисунке 5.1 показана схема расположения оборудования НШПС-1700 в ЛПЦ-1.



1 – рольганг; 2 – транспортер слябов; 3 – стол-штабелировщик для горячих слябов; 4 – толкатели; 5 – и 9 – загрузочный и отводящий печные рольганги; 6 – загрузочный стол; 7 – нагревательные печи; 8 – амортизаторы; 10 – клеть с вертикальными валками; 11 – устройство для гидросбива окалины; 12 – черновой окалиноломатель; 13 – черновая четырехвалковая клеть; 14 – черновые универсальные клетки; 15 – рольганг перед чистой непрерывной группой клетей; 16 – летучие ножницы для обрезки концов; 17 – чистой окалиноломатель; 18 – чистовая непрерывная группа клетей; 19 - отводящий рольганг; 20 – подъемно-поворотный стол; 21 – транспортер; 22 – моталки; 23 – мостовые краны; 24 – кантователи рулонов; 25 – передаточная тележка; 26 – агрегат поперечной резки; 27 – транспортер рулонов в цех холодной прокатки; 28 – гильотиновые ножницы; 29 – проходная нормализационная печь; 30 – стелажки для зачистки слябов; 31 – колодец для окалины.

Рисунок 5.1 – Схема расположения оборудования НШПС-1700 в ЛПЦ-1

Отделение листоотделки оснащено двумя агрегатами продольной и двумя поперечной резки.

Для повышения прочностных свойств сталей марок 15ГЮТ, 20ГЮТ применяется упрочняющая термообработка в проходной роликовой печи – нормализация с ускоренным охлаждением.

5.2 Технология производства горячекатаного листа на НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау»

Технологический цикл производства горячекатаного листа на НШПС 1700 АО «АрселорМиттал Темиртау» включает нагрев слябов в методических печах, прокатку в клетях черновой и чистой групп стана, охлаждение полос на отводящем рольганге, смотку полос в рулоны и порезку рулонов (в соответствии с заказами) на листы.

Стан 1700 предназначен для горячей прокатки полос толщиной от 1,5 мм до 12 мм, шириной от 800 мм до 1530 мм в рулонах массой до 23 т. Исходным материалом являются непрерывнолитые слябы толщиной 140-220 мм, шириной 700-1550 мм, длиной до 9,5 м. Марки стали, прокатываемые на стане, производятся по ГОСТ 380-94, ГОСТ 1050-88, ГОСТ 9045-93, ГОСТ

19281-89, ГОСТ 14959, ГОСТ 21427, ASTM A36M-94, ASTM A283M-93, ASTM A568M-98, DIN 17100, DIN 17162, JIS G3101, GIS G3125, GIS G3131, EN 10025, EN 10142 и другим зарубежным стандартам.

Температура поверхности слябов в томильной зоне методической печи, при длительности томления 35-60 мин, перед выдачей должна быть не выше 1200-1220⁰С. Превышение этой температуры может привести к размягчению окалины, налипанию ее на монолитный под, образованию бугров, мешающих нормальному проталкиванию слябов и к трудностям при чистке пода от окалины.

После нагрева в методических печах сляб подается на приемный рольганг и транспортируется к черновой группе клетей. В вертикальном окалиноломателе сляб получает абсолютное обжатие по ширине не более 60 мм. Далее взламывание окалины происходит в валках горизонтального окалиноломателя с кольцевым проточкам, выполненным на бочке валков. Впадины верхнего валка соответствуют выпуклым участкам нижнего, также допускается работа на гладких валках. Затем окалина удаляется гидросбивами.

После деформации в черновых окалиноломателях и клетки «кварто» раскат обжимается в 4-х универсальных черновых клетях до толщины 35-40 мм.

Ширина раската за клетью №5 должна быть на 25-30 мм больше номинальной ширины готового листа. Максимальные допустимые обжатия в клетях черновой группы приведены в таблице 1.1. Температурный режим прокатки (в зависимости от толщины готовой полосы) за клетью №5: 1020-1080⁰С.

Таблица 5.1 – Допустимые обжатия в клетях черновой группы, %

Сталь	Ширина заготовки, мм	Клеть						
		ВО	ГО	№1	№2	№3	№4	№5
Углеродистая	< 1250	2,0	23,5	26	30	34	38	37
	> 1250	2,0	20,0	23	25	26	30	32
Низколегированная	< 1250	2,0	20,0	22	25	27	31	34
	> 1250	2,0	18,0	20	22	24	28	32 1

Примечание: ВО и ГО – вертикальный и горизонтальный окалиноломатели

Далее раскат транспортируется по промежуточному рольгангу к чистовой группе стана. Перед чистовой группой производится обрезка концов раската на летучих ножницах и окончательное удаление окалины в чистовом окалиноломателе. Температура раскатов перед летучими ножницами должна быть не ниже 980 С. Обеспечение требуемой температуры конца прокатки достигается путем соблюдения установленных

режимов нагрева металла в печах, включением межклетевого охлаждения полосы, изменением скорости прокатки, ускорением стана, изменением толщины подката, допустимыми нагрузками на двигатели клетей, а также перераспределение обжатий по клетям стана 1700. Температура полосы за клетью №12 должна быть равна 820-870⁰С.

Ускорение чистовых клетей выбирается из условий равномерного распределения температуры и толщины полосы по ее длине. Допустимые обжатия и давления в клетях чистовой группы приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Допустимые обжатия и давления в клетях чистовой группы

Параметры	Ширина сляба, мм	Клеть						
		№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
Относительное обжатие, %	< 1250	52	49	44	38	31	25	22
	> 1250	50	47	42	36	29	22	17
Давление металла на валки, т	< 1530	1800	1960	2000	1500	1700	1500	1000

Для обеспечения необходимых механических свойств осуществляется душирование полос на отводящем рольганге. Режим охлаждения полос дифференцирован в зависимости от толщины полосы, марки стали и назначения.

Смотка полос осуществляется в следующем порядке: на моталки № 1-№3 принимаются полосы толщиной 1,8-4,0 мм; на моталки №4-№5 принимаются полосы толщиной 4,0-12,0 мм. Натяжение полосы между клетью №12 и моталками первой группы должно находиться в пределах 1,0-1,5 т, а моталками второй группы - 1,0-2,0 т. Температура полосы перед смоткой: 630-660⁰С.

Горячекатаные рулоны с температурой не более 50⁰С мостовым краном со склада подаются на приемный конвейер агрегатов резки АПР-1 и АПР-2.

Контроль технологического процесса производится на всех его стадиях: от загрузки слябов в методические печи до определения соответствия горячекатаных полос требования стандартов.

В случае нарушения требований к поперечному профилю, ширине горячекатаных полос и качеству поверхности производится корректировка настройки стана, после чего на участке моталок производится повторный отбор контрольного рулона с этой же партии для окончательной аттестации.

Отметим некоторые проблемы, имеющие место в настоящее время в ЛПЦ-1 АО «АрселорМиттал Темиртау» и возможные пути их решения.

С вводом в производство МНЛЗ увеличилась толщина слябов со 170-175 мм (катаных) до 200-220 мм, что приводит к увеличению времени нагрева слябов, увеличению нагрузок на клетки черновой группы, снижению

производительности стана. В большей мере нагрузки возрастали при прокатке «широких» и «толстых» слябов труднодеформируемых сталей (например, Х65 для трубной промышленности).

Возникла проблема низкотемпературной прокатки – для сталей специального назначения.

Для устранения указанных и других проблем намечены следующие мероприятия:

- строительство 5-ой методической печи;
- реконструкция 2-ой и 3-й методических печей (с заменой рекуператоров, рейтеров);
- усиление черновой группы клетей (установка дополнительной «5а» клетки);
- замена шестеренных клетей и зубчатых колес на более прочные (за счет науглероживания поверхности);
- усиление первых трех чистовых клетей и привода чистовой группы;
- модернизация системы охлаждения полос на отводящем рольганге (увеличение расхода воды, обеспечение требуемых температур смотки полос);
- реконструкция моталок (возможность смотки более толстых и более холодных полос).

Повысить конкурентоспособность металлопроката предполагается:

- техническим и организационным обеспечением поставки продукции по зарубежным стандартам;
- расширением сортамента готовой продукции;
- совершенствованием технологии с целью улучшения качества и сокращения затрат на производство, включая повышение уровня технической оснащенности при контроле параметров качества.

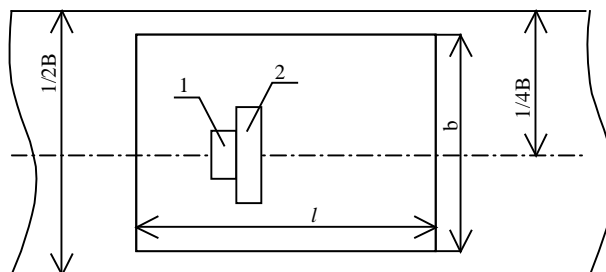
5.3 Методика определения механических свойств горячекатаного листа

Для испытаний на растяжение, сжатие и изгиб образцов толщиной до 7 мм использована универсальная испытательная машина типа ЦД-20, образцов толщиной более 7 мм – машина типа ЦД-40. Погрешность измеряемых величин составляет $\pm 1\%$.

Отбор контрольных карт на металле, прокатанном по зарубежным стандартам, ГОСТ 27772-88 и ГОСТ 17066-94, производится от одного рулона (контрольного) на участке моталок и от одного рулона (не контрольного) на адьюстаже цеха.

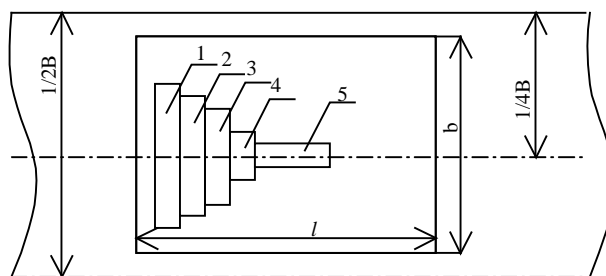
Отбор контрольных карт (500×500 мм), предназначенных для оценки уровня механических свойств по межгосударственным стандартам, производится:

- для проката толщиной от 1,5 до 3,9 мм всех марок сталей от второго витка одного рулона в партии по схеме, изображенной на рисунке 5.2;
- для проката толщиной от 4,0 мм и более всех марок сталей от первого витка одного рулона в партии по схеме, изображенной на рисунке 5.3.



- 1 – проба на растяжение;
- 2 – проба на изгиб;
- B – ширина полосы;
- l, b – длина и ширина карты.

Рисунок 5.2 – Схема вырезки проб для проведения механических испытаний на прокате толщиной до 3,9 мм



- 1 – проба на старение;
- 2 – проба на растяжение;
- 3 – проба на ударный изгиб (поперечный);
- 4 – проба на ударный изгиб (продольный);
- 5 – проба на изгиб.

Рисунок 5.3 – Схема вырезки проб для проведения механических испытаний на прокате толщиной более 3,9 мм

Отбор карт для проведения механических испытаний от листов толщиной от 8,0 до 16,0 мм спокойных и полуспокойных марок сталей обыкновенного качества, поставляемых по ГОСТ 14637-89 и их аналогов по межгосударственным стандартам, производится от первого витка одного рулона в партии на расстоянии не менее 3 м от конца полосы.

Размеры проб для механических испытаний представлены в таблице 5.3. Рабочая длина l_0 плоских образцов для испытания на растяжение,

толщиной 4мм и более должна быть в пределах от $+1,5\sqrt{F_0}$ до $+2,5\sqrt{F_0}$, где – F_0 – площадь поперечного сечения рабочей части образца до разрыва.

Таблица 5.3 – Размеры проб для механических испытаний

Вид испытания	Толщина проката, мм	Длина пробы, мм	Ширина пробы, мм
Растяжение	от 1,5 до 3,9	230	30
	от 3,9 до 7,0	230	30
	от 7,0 до 12,0	280	50
Изгиб	от 1,5 до 3,9	160	35
	от 3,9 до 7,0	180	40
	от 7,0 до 12,0	200	45

Основные требования, предъявляемые к установке образцов: способ крепления не должен допускать проскальзывания образцов в захватах, смятия опорных поверхностей, деформацию головок и разрушение образца в местах перехода от рабочей части к головкам и в головки. Разметку расчетной длины образца следует выполнять с точностью до 1%.

Измерение образцов до испытания проводили не менее чем в трех местах, площадь поперечного сечения вычисляли по наименьшим из полученных размеров. При проведении испытаний необходимо соблюдать надежное центрирование образца в захватах испытательной машины, плавность нагружения. Скорость перемещения подвижного захвата не должна превышать 0,1 при испытании до предела текучести, и за пределом текучести быть не менее 0,4 длины расчетной части образца при выражении ее в миллиметрах в минуту. Точность отсчета нагрузки при испытании — одно наименьшее деление шкалы силоизмерителя. Предел текучести σ_T определяли по диаграмме растяжения, полученной на испытательной машине при условии, что масштаб диаграммы по оси усилия является таким, что 1 мм соответствует напряжению не более 10 Н/мм².

При определении предела текучести σ_T скорость относительной деформации рабочей части образца на стадии текучести должна быть в пределах от 0,00025 до 0,0025 с⁻¹. Скорость относительной деформации должна поддерживаться по возможности постоянной.

Для определения временного сопротивления σ_B образец подвергали растяжению под действием плавно возрастающего усилия до разрушения.

Наибольшее усилие, предшествующее разрушению образца, принимается за усилие P_{max} , соответствующее временному сопротивлению.

При определении временного сопротивления σ_B скорость деформирования должна быть не более 0,5 от начальной расчетной длины образца l_0 , выраженной в миллиметрах в минуту. Временное сопротивление σ_B , вычисляют по формуле:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0} \quad (5.1)$$

Определение относительного равномерного удлинения проводили на образцах с начальной расчетной длиной l_0 не менее $11,3 \sqrt{F_0}$. Относительное равномерное удлинение δ_p определяли на большей части разрушенного образца на расчетном участке А'В' (рисунок 5.4), отстоящем на расстоянии не менее чем $2d_0$ или $2b_0$ от места разрыва. Конечная длина расчетного участка $l_{кр}$ должна быть не менее $2d$ или $1,5b_0$. Начальную длину расчетного участка $l_{нп}$ определяют по количеству меток на расчетном участке и начальному расстоянию между ними.

Относительное равномерное удлинение δ_p , %, вычисляется по формуле:

$$\delta_p = \frac{(l_{кр} - l_{нп}) \cdot 100}{l_{нп}} \quad (5.2)$$

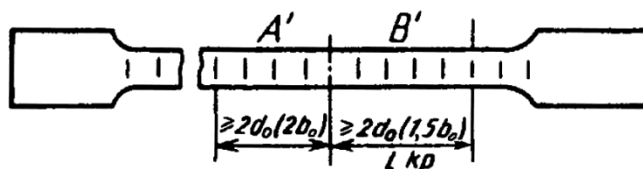


Рисунок 5.4 – Части разрушенного образца

Твердость измеряли методом Бринелля, сущность которого заключается во вдавливании стального шарика в образец под действием нагрузки, приложенной перпендикулярно поверхности образца, в течение определенного времени и измерений диаметра отпечатка после снятия нагрузки.

5.4 Требования стандартов к качеству горячекатаного листа

Качество продукции обычно определяется совокупностью свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Современная европейская система управления качеством начала формироваться в 80-е годы. Ее признаки: единые законодательные требования, единые стандарты, единые процессы проверки. основополагающими стандартами признаны ИСО 9000 (International Standard Organization) и EN 29000, главная особенность которых – регламентирование работ по созданию систем управления качеством.

В стандартах качество металлургической продукции определяется, с одной стороны, нормой потребительских свойств (характеристик), а с другой стороны – нормой различных допустимых дефектов металла и готовой металлопродукции. Технические требования на каждый конкретный вид

продукции приведены в соответствующих ГОСТах или ТУ. Эти документы являются строго обязательными для предприятий-производителей.

Стандарты на прокат отражают возможности имеющегося оборудования прокатных цехов, требования к нему, накопленный опыт промышленности. Непрерывное развитие науки и техники влечет за собой расширение стандартов и ужесточение требований к качеству. Своевременное внедрение нового стандарта позволяет повысить эффективность производства, однако это должно обеспечиваться предварительной технологической проработкой, организационной подготовкой и финансово-экономическим обоснованием.

Совокупность характеризующих продукцию свойств можно разбить на две группы. Свойства одной группы создаются в процессе производства продукции, при ее изготовлении в соответствии с требованиями технических условий. Это – производственное качество продукции, которое является выражением технической стороны потребительской стоимости. Свойства другой группы – экономические, проявляются они в процессе использования продукции.

Качество листовой продукции определяют по сортаменту, предельным отклонениям геометрических размеров, химическому составу металла и его предельным отклонениям, механическим свойствам, макро- и микроструктуре, требованиям к глубине обезуглероженного слоя, состоянию поверхности и др.

Для примера рассмотрим требования к горячекатаному листу, поставляемого на экспорт по ASTM A568M-95. Химический состав стали должен соответствовать требованиям, приведенным в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Химический состав стали

Марка стали по ASTM A568M	Марка-аналог	C	Mn	P max	S max
1	2	3	4	5	6
1006	08кп, 08пс	0,04-0,08	0,25-0,45	0,030	0,035
1008	08кп, 08пс	0,05-0,10	0,30-0,50	0,030	0,035
1009	2кп, 2пс, 2сп, 10кп, 10пс	0,10-0,15	0,30-0,60	0,030	0,035
1010	10кп, 10пс	0,08-0,13	0,30-0,60	0,030	0,035
1012	2кп, 2пс	0,10-0,15	0,30-0,60	0,030	0,035
1015	3кп, 3пс	0,12-0,18	0,30-0,60	0,030	0,035
1016	3Гпс	0,12-0,18	0,60-0,90	0,030	0,035:
1017	3кп, 3пс, 3сп	0,14-0,20	0,30-0,60	0,030	0,035
1018	3Гпс	0,14-0,20	0,60-0,90	0,030	0,035
1019	3Гпс	0,14-0,20	0,70-1,00	0,030	0,035
1020	4кп, 4пс, 4сп	0,17-0,23	0,30-0,60	0,030	0,035
1021	3Гпс	0,17-0,23	0,60-0,90	0,030	0,035
1022	3Гпс	0,17-0,23	0,70-1,00	0,030	0,035

Продолжение таблицы 5.4

1	2	3	4	5	6
1023	4кп, 4пс, 4сп	0,19-0,25	0,30-0,60	0,030	0,035
1025	4кп, 4пс, 4сп	0,22-0,28	0,30-0,60	0,030	0,035
1026	4кп, 4пс, 4сп	0,22-0,28	0,60-0,90	0,030	0,035
1030	5пс, 5сп	0,27-0,34	0,60-0,90	0,030	0,035
1033	5пс, 5сп	0,29-0,36	0,70-1,00	0,030	0,035
1035	5пс, 5сп	0,31-0,38	0,60-0,90	0,030	0,035
1037	5пс, 5сп	0,31-0,38	0,70-1,00	0,030	0,035
1038	6пс, 6сп	0,34-0,42	0,60-0,90	0,030	0,035
1039	6пс, 6сп	0,36-0,44	0,70-1,00	0,030	0,035
1040	6пс, 6сп	0,36-0,44	0,60-0,90	0,030	0,035
1524	17Г1С	0,18-0,25	1,30-1,65	0,030	0,035

Прокат поставляется в листах и рулонах с обрезанной и необрезанной кромкой. Размеры указаны соответственно в таблицах 5.5-5.6. Предельные отклонения по толщине проката указаны в таблице 5.7.

Таблица 5.5 – Размеры поставляемого проката в листах, мм

Толщина	Ширина	Длина
от 2,0 до 4,0	от 860 до 1200	от 1500 до 6000
от 4,0 до 4,5	от 860 до 1450	от 3000 до 12000
от 4,6 до 6,0	от 860 до 1200	от 3000 до 12000

Таблица 5.6 – Размеры поставляемого проката в рулонах, мм

Толщина	Ширина
от 2,0 до 3,9	от 860 до 1200
от 4,0 до 4,5	от 860 до 1450
от 4,6 до 6,0	от 860 до 1200

Таблица 5.7 – Предельные отклонения по толщине проката

Ширина проката, мм	Допустимые отклонения по толщине для минимальных толщин, мм		
	до 2,5	от 2,5 до 4,5	от 4,5 до 6,0
от 860 до 1200	+0,35	+0,40	+0,45
от 1200 до 1450	+0,35	+0,40	-

Приведенные допуски по толщине применяются и в том случае, если заказана номинальная толщина и допуски делятся на равные минусовые и плюсовые. Толщина измеряется в любой точке поперек полосы на расстоянии не менее 10 мм от обрезанной кромки и 20 мм от необрезанной.

Косина реза листов – половина разницы в длине диагоналей. Предельные отклонения по косине реза не должны превышать 1,0 мм на каждые 100 мм ширины.

Предельные отклонения по плоскостности для листов без обработки на правильно-растяжной машине (ПРМ) представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Предельные отклонения по плоскостности для листов без обработки на ПРМ

Толщина, мм	Ширина, мм	Предельные отклонения, мм	
		до 310 МПа	310-345 МПа
от 2,0 до 4,5	от 860 до 1450	15	20
от 4,5 до 6,0	от 860 до 1200	15	20

Предельные отклонения по плоскостности для листов с обработкой на правильно-растяжной машине представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Предельные отклонения по плоскостности для листов с обработкой на ПРМ

Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Предельные отклонения, мм	
			до 310 МПа	310-345 МПа
от 2,0 до 4,5	до 1200	до 2400	3	устанавливаются в контракте
от 2,0 до 4,5	от 1200	от 2400	6	
от 4,5 до 6,0	до 1200	до 2400	3	
от 4,5 до 6,0	от 1200	от 2400	6	

Нормируемые параметры качества листа в зависимости от категории качества даны в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Нормируемые показатели качества проката

Категория	Химический состав	Механические свойства при растяжении и изгибе	Ударная вязкость КСЧ			
			при температуре, °С			после механического старения
			+20	-20	-40	
1	-	+	-	-	-	-
2	+	+	-	-	-	-
3	+	+	+	-	-	-
4	+	+	-	+	-	-
5	+	+	-	+	-	+
6	+	+	-	-	+	+

Механические свойства проката (ГОСТ 14637-89) категорий 1-5 при испытании на растяжение и изгиб должны соответствовать нормам, приведенным в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Требования к механическим свойствам проката толщиной до 20 мм

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
Зсп	не менее 245	370-480	не менее 26

5.5 Исследование механических свойств горячекатаного металла

Исследованию подвергли 72 партии горячекатаных полос, марка стали Зсп, произведенных на НШПС-1700 из литых слябов, в том числе для толщин: 3мм до 4мм – 9 партий; от 4мм до 6мм – 10 партий; от 6 мм до 8 мм – 10 партий; более 8мм – 43 партий. Для сопоставления использовали данные ранее выполненных исследований механических свойств 255 партий горячекатаных полос, марка стали Зсп, произведенных на НШПС-1700 из катаных слябов, в том числе для толщин: от 3мм до 4мм – 21 партия; от 4мм до 6 мм – 51 партия; от 6 мм до 8мм – 35 партий; более 8мм – 148 партий.

Данные о механических свойствах, полученные в результате испытаний, подвергли статической обработке, включающий проверку на наличие промахов, соответствие нормальному закону распределения, определение основных статических характеристик выборок и т.д [2-5]. Фрагменты результатов статической обработки данных приведены в таблицах 5.12 и 5.13.

Таблица 5.12 – Результаты механических испытаний листа толщиной от 3,0 мм до 4,0 мм

σ_B		σ_T		δ	
МПа	частота случаев σ_B , %	МПа	частота случаев σ_T , %	%	частота случаев δ , %
1-ая группа сталей					
450	4,76	330	4,76	26	4,76
460	4,76	340	9,52	27	9,52
470	9,52	350	19,05	28	14,29
480	9,52	360	14,29	29	14,29
490	4,76	370	19,05	30	14,29
500	28,57	380	19,05	32	4,76
510	14,29	390	14,29	33	14,29
520	9,32	-	-	34	14,29
530	9,52	-	-	37	4,76
540	4,76	-	-	39	4,76
2-ая группа сталей					
480	20	360	20	29	20
485	20	365	40	30	20
490	20	375	20	31	20
500	20	385	20	32	40

Примечание: средние квадратические отклонения: $S_{\sigma_B}=24,24$ МПа, $S_{\sigma_T}=17,86$ МПа, $S_{\delta}=3,45\%$ для катаного металла; $S_{\sigma_B}=12,04$ МПа, $S_{\sigma_T}=10$ МПа, $S_{\delta}=1,30\%$ для непрерывнолитого металла.

Таблица 5.13 – Результаты механических испытаний листа толщиной от 4,0 до 6,0 мм

σ_B		σ_T		δ	
МПа	частота случаев $\sigma_B, \%$	МПа	частота случаев $\sigma_T, \%$	%	частота случаев $\delta, \%$
1-ая группа сталей					
420	1,96	310	1,96	21	1,96
430	1,96	320	7,84	22	1,96
440	1,96	330	11,76	26	11,76
450	3,92	340	15,69	27	13,73
460	9,8	350	15,69	28	3,92
470	3,92	360	9,8	29	11,76
480	7,84	370	9,8	30	5,88
490	13,73	380	3,92	31	11,76
500	13,73	390	5,88	32	11,76
510	7,84	400	3,92	33	5,88
520	13,73	410	1,96	34	3,92
530	5,88	420	1,96	35	11,76
560	1,96	430	5,88	37	1,96
570	1,96	440	1,96	38	1,96
580	5,88	450	1,96	-	-
590	1,96	-	-	-	-
600	1,96	-	-	-	-
2-ая группа сталей					
455	10	330	10	25	10
485	40	350	20	26	20
495	10	360	40	27	10
505	20	370	10	28	10
515	10	380	10	29	10
525	10	400	10	30	20
				31	10
				32	10

Примечание: средние квадратические отклонения: $S_{\sigma_B}=41,21$ МПа, $S_{\sigma_T}=35,67$ МПа, $S_{\delta}=3,66\%$ для катаного металла; $S_{\sigma_B}=18,47$ МПа, $S_{\sigma_T}=17,16$ МПа, $S_{\delta}=2,37\%$ для непрерывнолитого металла.

В примечаниях к таблицам 5.12 и 5.13 через S_{σ_B} , S_{σ_T} , S_{δ} обозначены средние квадратические отклонения предела прочности σ_B , предела текучести σ_T , относительного удлинения δ . В этих же таблицах 1-я группа сталей объединяет свойства горячекатаных полос, произведенных из катаных слябов, 2-я группа – свойства горячекатаных полос, произведенных из литых слябов.

На рисунках 5.5 – 5.16 представлены диаграммы распределений исследуемых величин.



Рисунок 5.5 – Гистограмма распределения σ_T листа толщиной от 6,0 до 8,0 мм из катаного металла

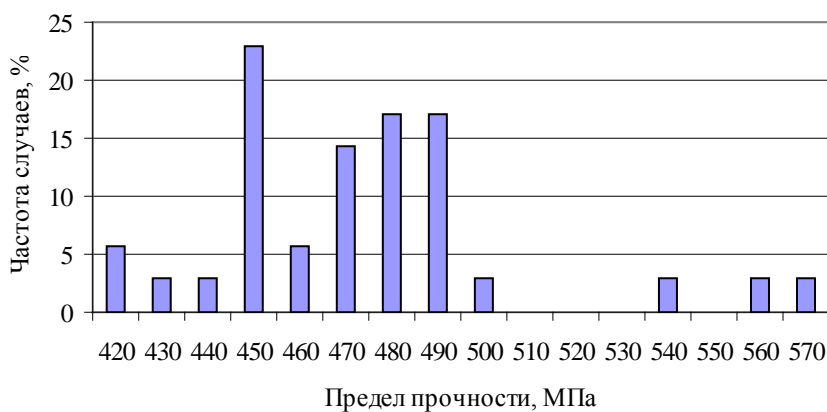


Рисунок 5.6 – Гистограмма распределения σ_B листа толщиной от 6,0 до 8,0 мм из катаного металла



Рисунок 5.7 – Гистограмма распределения δ листа толщиной от 6,0 до 8,0 мм из катаного металла

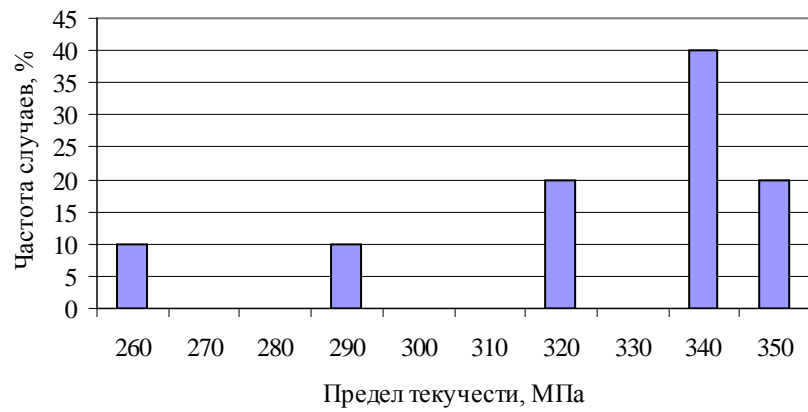


Рисунок 5.8 – Гистограмма распределения σ_T листа толщиной от 6,0 до 8,0 мм из непрерывнолитого металла

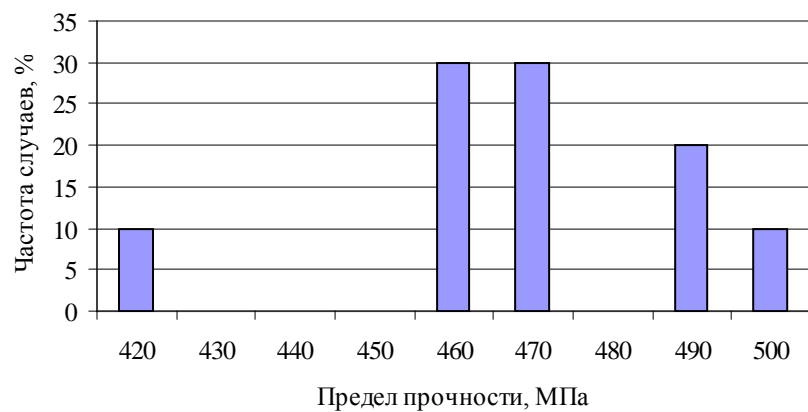


Рисунок 5.9 – Гистограмма распределения σ_B листа толщиной от 6,0 до 8,0 мм из непрерывнолитого металла

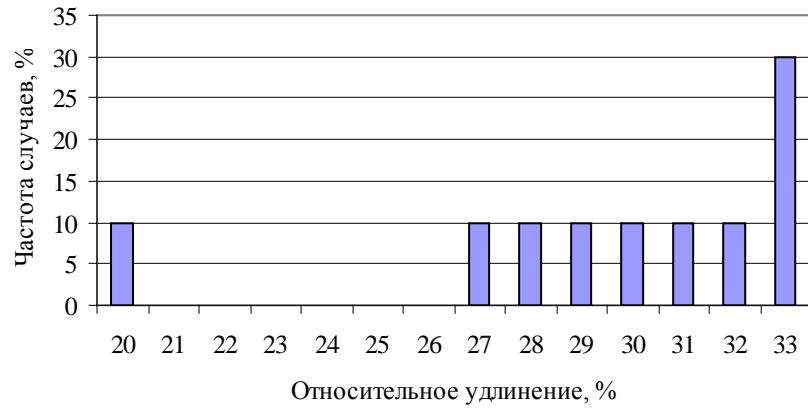


Рисунок 5.10 – Гистограмма распределения δ листа толщиной от 6,0 до 8,0 мм из непрерывнолитого металла

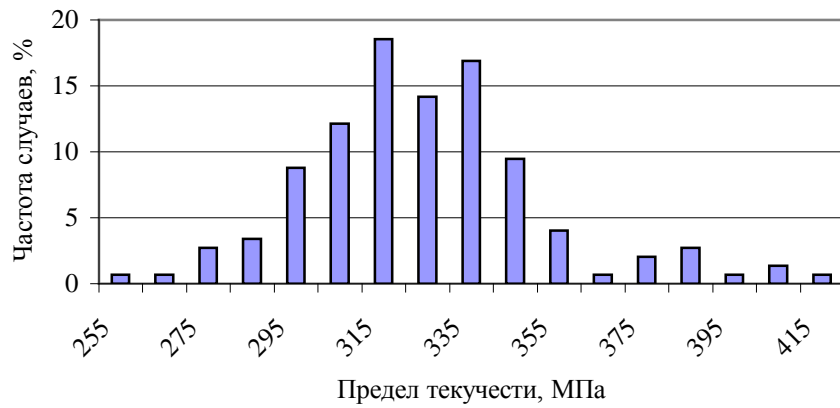


Рисунок 5.11 – Гистограмма распределения σ_T листа толщиной более 8,0 мм из катаного металла

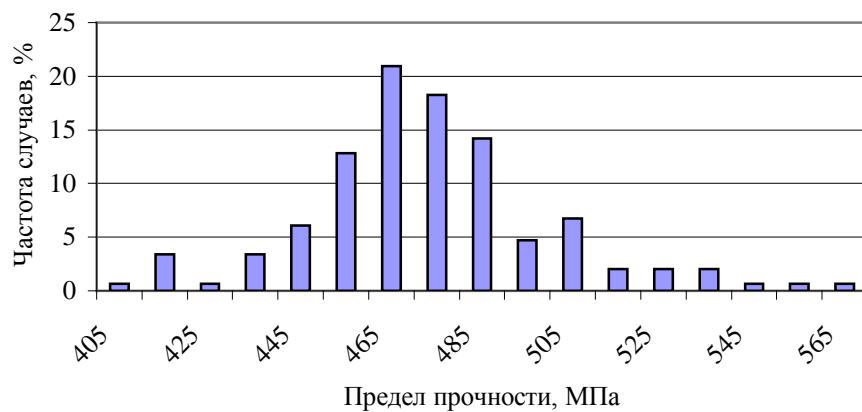


Рисунок 5.12 – Гистограмма распределения σ_B листа толщиной более 8,0 мм из катаного металла



Рисунок 5.13 – Гистограмма распределения δ листа толщиной более 8,0 мм из катаного металла

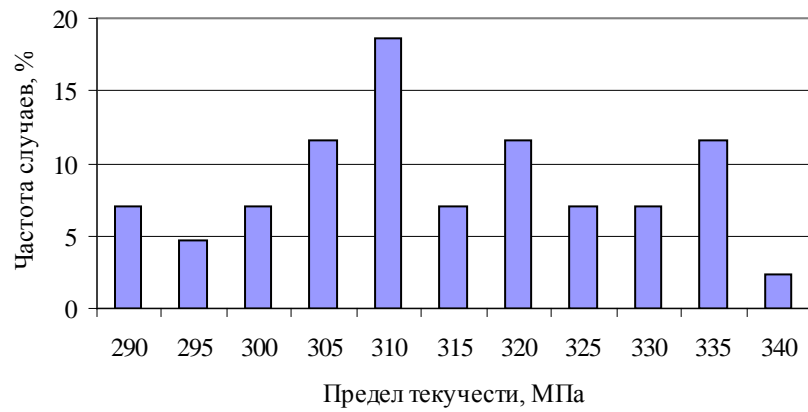


Рисунок 5.14 – Гистограмма распределения σ_T листа толщиной более 8,0 мм из непрерывнолитого металла

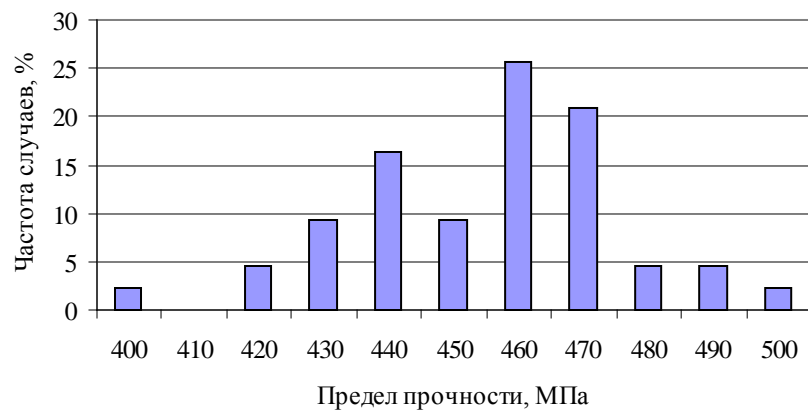


Рисунок 5.15 – Гистограмма распределения σ_B листа толщиной более 8,0 мм из непрерывнолитого металла



Рисунок 5.16 – Гистограмма распределения δ листа толщиной более 8,0 мм из непрерывнолитого металла

Для распределений, изображенных на рисунках 5.5-5.10: средние квадратические отклонения $S_{\sigma_B}=33,43$ МПа, $S_{\sigma_T}=30,52$ МПа, $S_{\delta}=2,98\%$ для слиточного металла; $S_{\sigma_B}=21,58$ МПа, $S_{\sigma_T}=28,99$ МПа, $S_{\delta}=4,0\%$ для непрерывнолитого металла. Для распределений изображенных на рисунках 5.11-5.16: средние квадратические отклонения $S_{\sigma_B}=26,9$ МПа, $S_{\sigma_T}=27,0$ МПа, $S_{\delta}=3,4\%$ для слиточного металла; $S_{\sigma_B}=20,8$ МПа, $S_{\sigma_T}=15,44$ МПа, $S_{\delta}=3,31\%$ для непрерывнолитого металла.

Анализ наиболее представительных по объему данных проката, толщиной более 8 мм, показывает:

а) для горячекатаных полос, произведенных из катаных слябов (1-я группа сталей):

- σ_T колеблется от 255 до 415 МПа. Доля соответствия нормативным требованиям (не менее 245 МПа) – 100% (рисунок 5.11);

- σ_B колеблется от 405 до 565 МПа. Доля соответствия нормативным требованиям (370-480 МПа) – 67% (рисунок 5.12);

- δ колеблется от 18% до 35%. Доля соответствия нормативным требованиям (не менее 26%) – 67% (рисунок 5.13);

б) для горячекатаных полос, произведенных из литых слябов (2-я группа сталей):

- σ_T колеблется от 290 до 340 МПа. Доля соответствия нормативным требованиям (не менее 245 МПа) – 100% (рисунок 5.14);

- σ_B колеблется от 400 до 500 МПа. Доля соответствия нормативным требованиям (370-480 МПа) – 93% (рисунок 5.15);

- δ колеблется от 23% до 36%. Доля соответствия нормативным требованиям (не менее 26%) – 93% (рисунок 5.16).

Таким образом, механические свойства проката, произведенного из непрерывнолитых слябов, находятся в более узких пределах и доля их соответствия нормативным требованиям на 26% выше (σ_B и δ), чем проката, произведенного из катаных слябов.

Наряду с улучшением механических свойств горячекатаного листа, произведенного из литых слябов, по сравнению с листом, произведенным из катаных слябов, увеличился выход продукции 1-го сорта, уменьшилась

отсортировка металла во 2-й сорт по рваной кромке, по плене, по смятой кромке, по телескопу, по неплоскостности. Общие показатели качества горячекатаного листа, произведенного за год по двум технологиям (из катанных и непрерывнолитых слябов), представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Показатели качества горячекатаного листа

Показатель	Слиточный металл	Непрерывнолитой металл
Прокатано, т	1737912	314091,34
1 сорт, %	93,73	97,2
Отсортировка, %:	6,27	2,8
в том числе		
- по дефектам стали	2,89	0,03
- по дефектам проката	3,38	2,77

Улучшились другие показатели технологического процесса: уменьшились угар металла в методических нагревательных печах, отходы металла с концевой обрезью раскатов на летучих ножницах, расходный коэффициент.

По результатам исследований, выполненных при прохождении балансовых плавов на переделе МНЛЗ – ЛПЦ-1, угар металла составил 19,39 кг/т (22,0 кг/т по бизнес плану), отходы металла с концевой обрезью 4,31 кг/т (5,5 кг/т по бизнес-плану), расходный коэффициент 1,024 кг/т (1,029 кг/т по бизнес-плану).

5.6 Квалиметрическая оценка качества горячекатаного листа

5.6.1 Методика квалиметрической оценки качества

Свойствами, определяющими качество листового проката, являются его геометрические параметры, структура металла, механические свойства: пределы прочности и текучести, относительное удлинение и сужение, т.е. достаточно большое количество показателей. Химический состав стали является классификационным признаком. Однако лишь по измеренным показателям нельзя оценить качество, т.к. они характеризуют различные свойства, которые обычно не коррелированы и имеют различную размерность. Поэтому получение одного показателя качества в требуемых пределах вовсе не гарантируют выполнение других показателей. Кроме того, оптимизация технологического процесса требует наличие одного критерия. В этих условиях для совершенствования технологии прокатки и достоверной оценки качества проката с целью его улучшения необходимо использовать комплексные показатели качества, разработанные в квалиметрии [12-13].

Задача разработки комплексного критерия качества листа может быть решена на основе следующих принципов квалиметрии [14-15]:

1) качество продукции есть иерархическая совокупность свойств, обусловленных потребителем, причем наиболее общие (комплексные) свойства располагаются на нижних уровнях по отношению к менее общим (простым);

2) по измеренным значениям простых свойств (путем их сравнения с некими эталонами) вычисляются комплексные оценки качества;

3) комплексные оценки качества определяются таким образом, что разные по своей природе и измеренные различными физическими методами свойства можно было сравнить между собой, т.е. их приводят к одной шкале;

4) базовыми требованиями к качеству (эталонами) должны быть требования, изложенные в стандартах (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.д.);

5) в основе определения значения оценок качества должен лежать статистический подход;

6) оценка качества должна иметь конкретное численное значение, отражающее состояние объекта.

Применительно к изделиям металлообработки для подавляющего большинства объектов квалиметрии показатели свойств качества, как правило, располагаются на трех иерархических уровнях [16].

На верхнем уровне ($i = 2$) располагаются нормированные показатели R_{ij} простых свойств r_{ij} , имеющие коэффициенты весомости α_{ij} , где i - номер уровня; j - номер свойства. При этом должно выполняться условия:

$$\alpha_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sum_{j=1}^n l_{ij}}; \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} = 1, \quad (5.3)$$

где l_{ij} – показатели нормированных весомостей, устанавливаемые экспертным способом для подмножества простых свойств r_{ij} .

Второй иерархический уровень свойств ($i = 1$) отведен дифференциальным показателям сложных свойств $k_{ij^*} = F(R_{ij})$ с коэффициентами весомостей $\alpha_{ij^*}^* (j^* = 1, 2, \dots, q)$. Нахождение дифференциального показателя качества сводится к нормированию натуральных значений данного свойства и последующей обработке согласно двойному показательному закону распределения Харрингтона. Для данного иерархического уровня должны выполняться условия:

$$a_{ij^*}^* = \frac{l_{ij^*}}{\sum_{j^*=1}^q l_{ij^*}}; \sum_{j^*=1}^q a_{ij^*}^* = 1; k_{ij^*} = \exp[-\exp\{-Y_{ij^*}^* [r_{ij^*}, A_{ij^*}]\}], \quad (5.4)$$

где l_{ij^*} – имеет смысл аналогичный l_{ij} , но используется для подмножества k_{ij^*} ; A_{ij^*} – эмпирические константы ($j = 1 \dots 6$).

Для показателей, расположенных на нулевом иерархическом уровне ($i = 0$), комплексный показатель качества K_0 определяется суммированием дифференциальных показателей:

$$K_o = \sum_{j^*=1}^q \alpha_{ij^*}^* \cdot k_{ij^*}. \quad (5.5)$$

Константы $A_1 \dots A_6$ определяются по эмпирическим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \bar{r} + \alpha_1 \frac{S}{\sigma_N}; & A_2 &= \bar{r} + \alpha_2 \frac{S}{\sigma_N}; \\ A_3 &= \bar{r} - 2 \cdot S; & A_4 &= \bar{r} + 2 \cdot S; \\ A_5 &= \bar{r} - \alpha_2 \frac{S}{\sigma_N}; & A_6 &= \bar{r} - \alpha_1 \frac{S}{\sigma_N}, \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

где \bar{r} – среднее арифметическое значение показателя r_i , полученное по выборке из N экспериментальных значений;

S – его среднее квадратическое отклонение;

α_1 и α_2 – коэффициенты, определяемые из соотношений (5.9);

σ_N – параметр, определяемый из соотношения (5.10).

Здесь для вычисления параметра Y^* , при выполнении условия $A_j > A_{j+1}$, используются следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} Y^* &= 0,48165 \frac{r_{ij} - A_1}{A_2 - A_1} - 0,47588, & r_i &\in [A_1, A_2]; \\ Y^* &= 0,76634 \frac{r_{ij} - A_2}{A_3 - A_2} + 0,00577, & r_i &\in [A_2, A_3]; \\ Y^* &= 0,72783 \frac{r_{ij} - A_3}{A_4 - A_3} + 0,77211, & r_i &\in [A_3, A_4]; \\ Y^* &= 0,75043 \frac{r_{ij} - A_4}{A_5 - A_4} + 1,49994, & r_i &\in (A_4, A_5]; \\ Y^* &= 2,348971 \frac{r_{ij} - A_5}{A_6 - A_5} + 2,25037, & r_i &\in (A_5, A_6]. \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Для случая $A_j < A_{j+1}$ необходимо использовать соотношения (5.8):

$$\left. \begin{aligned} Y^* &= 0,48165 \frac{A_1 - r_{ij}}{A_1 - A_2} - 0,47588, & r_i &\in [A_1, A_2); \\ Y^* &= 2,348971 \frac{A_5 - r_{ij}}{A_5 - A_6} + 2,25037, & r_i &\in (A_5, A_6]. \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

При этом для интервалов $[A_2, A_3)$, $[A_3, A_4]$, $(A_4, A_5]$ для зависимостей (5.6) остаются справедливыми соотношения (5.7).

Коэффициенты α_1 и α_2 определяются из соотношений:

$$\alpha_1 = Y_N - 7,565 \frac{\sigma_N}{\sqrt{N}} - 2,97; \quad \alpha_2 = Y_N - 2,97, \quad (5.9)$$

где параметры Y_N и σ_N могут быть заимствованы из работы [5] или определены по зависимостям:

$$Y_N = a + b * \ln N ; \sigma_N = c + d * \ln N . \quad (5.10)$$

Эмпирические коэффициенты a , b , c и d получены в результате математической обработки экспериментальных данных [8].

5.6.2 Оценка качества горячекатаного листа марки стали 08Ю

В работе решалась задача квалитетической оценки качества горячекатаного листа, произведенного из непрерывнолитых слябов стали 08Ю. Для сопоставления использовали данные ранее выполненных в условиях НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау» исследований свойств горячекатаных полос, полученных из слиточной стали 08кп. Размеры горячекатаных полос $3,5 \times 1265$ мм.

Вырезку стандартных образцов для оценки свойств производили из хвостовой части рулонов, по краям и середине. Использовали по 10 рулонов горячекатаных полос указанных марок стали.

В качестве единичных показателей учитывали механические свойства: пределы прочности σ_B и текучести σ_T , относительное удлинение δ и твердость HRB – для горячекатаного листа.

Результаты измерений механических свойств образовали выборку объемом более 1000 наблюдений. Выборку подвергли статистическому анализу с проверкой на наличие грубых ошибок и соответствие нормальному закону распределения. В таблице 5.15 представлены фрагменты этой выборки.

Таблица 5.15 – Результаты механических испытаний горячекатаных полос

№ рулона	По ширине листа	Механические свойства			
		Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость HRB
1	2	3	4	5	6
1	край	350/360	266/250	16/30	60/60,5
	середина	365/362	284/274	20.4/32,1	62/65,1
	край	354/355	265/267	18.1/30,8	59,4/61,8
2	край	420/387	386/298	32,4/35,1	78,1/69,5
	середина	450/392	410/304	35/36,2	69,5/70,2
	край	435/384	392/302	30,8/36,1	76,4/69,9
...

Продолжение таблицы 5.15

1	2	3	4	5	6
9	край	401/375	371/304	26,1/34,5	70,4/66,7
	середина	425/379	384/306	29,7/35,1	73,8/66,9
	край	416/381	365/302	24,6/34,8	70,5/35,4
10	край	402/372	298/276	26,8/34,7	67,9/64,1
	середина	408/376	317/284	31,7/34	71,5/65
	край	394/370	302/280	27,9/33,7	68,5/63,8

Примечание: числитель – сталь 08кп; знаменатель – сталь 08ю.

Далее рассчитали дифференциальные и комплексные показатели качества горячекатаного листа (таблица 5.16).

Таблица 5.16 – Дифференциальные и комплексные показатели качества горячекатаного листа

По ширине листа	Значение	Дифференциальные показатели качества k_{ij}				Комплексный показатель качества K_0
		Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость HRB	
край	среднее	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7228</u>
		0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7228
	min	<u>0,6545</u>	<u>0,6507</u>	<u>0,6440</u>	<u>0,6476</u>	<u>0,6492</u>
край	max	0,6690	0,6494	0,6403	0,6590	0,6544
		<u>0,7891</u>	<u>0,7714</u>	<u>0,7812</u>	<u>0,7875</u>	<u>0,7784</u>
	0,7900	0,7789	0,7735	0,7802	0,7732	
середина	среднее	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7229</u>
		0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7228
	min	<u>0,6566</u>	<u>0,6622</u>	<u>0,6376</u>	<u>0,6378</u>	<u>0,6484</u>
середина	max	0,6694	0,6654	0,6688	0,6438	0,6710
		<u>0,7770</u>	<u>0,7692</u>	<u>0,7783</u>	<u>0,7943</u>	<u>0,7775</u>
	0,7882	0,7777	0,7818	0,7805	0,7820	
край	среднее	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7229</u>
		0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7228
	min	<u>0,6523</u>	<u>0,6615</u>	<u>0,6459</u>	<u>0,6380</u>	<u>0,6494</u>
край	max	0,6606	0,6556	0,6622	0,6691	0,6676
		<u>0,7746</u>	<u>0,7735</u>	<u>0,7815</u>	<u>0,7789</u>	<u>0,7754</u>
	0,7851	0,7775	0,7761	0,7763	0,7780	
общее	среднее	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7229</u>
		0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7228
	min	<u>0,6523</u>	<u>0,6507</u>	<u>0,6376</u>	<u>0,6376</u>	<u>0,6484</u>
общее	max	0,6606	0,6494	0,6403	<u>0,6438</u>	0,6544
		<u>0,7891</u>	<u>0,7735</u>	<u>0,7815</u>	<u>0,7943</u>	<u>0,7784</u>
	0,7900	0,7789	0,7818	0,7805	0,7820	

Примечание: числитель - сталь 08кп; знаменатель - сталь 08ю.

В таблице 5.17 приведены результаты первичной статистической обработки выборок комплексного показателя качества горячекатаного листа, произведенного из литых (сталь 08ю) и катаных (сталь 08кп) слэбов.

Таблица 5.17 – Показатели статистических распределений комплексных показателей качества горячекатаного листа

Показатель	Горячекатаный лист	
	Сталь 08 кп	Сталь 08 ю
Среднее значение	0,7229	0,7228
Стандартная ошибка	0,0072	0,0068
Медиана	0,7271	0,7216
Стандартное отклонение	0,03934	0,0372
Дисперсия	0,0015	0,0014
Эксцесс	-0,7112	-0,9909
Асимметричность	-0,4539	-0,0395
Максимальное значение	0,7784	0,7820
Минимальное значение	0,6484	0,6544

Из сравнения средних значений комплексного показателя K_{0CP} следует, что различие в качестве горячекатаного металла, произведенного из непрерывнолитых слэбов стали 08ю и слиточной стали 08кп не выявлено. В соответствии с эмпирической шкалой желательности качество горячекатаного листа соответствует «хорошей» оценке.

5.6.3 Оценка качества горячекатаного листа марки стали S235JR

На АО «АрселорМиттал Темиртау» в достаточно больших объемах производят горячекатаные полосы марки S235JR спокойного (FF) и полуспокойного (FN) исполнения. Эта сталь в соответствии со стандартом EN 10025-2:2004 в зависимости от толщины полосы должна иметь не только определенный химический состав, но и определенные механические свойства. А для этого сталь микролегируют ниобием (Nb), служащим для измельчения зерна аустенита и феррита в процессе нагрева под прокатку или термическую обработку. Кроме того, он тормозит рекристаллизацию аустенита при термомеханической прокатке, которая приводит к такому измельчению зерна, которое не может быть достигнуто никаким процессом термической обработки. Аналогом стали S235JR на предприятии АО «АрселорМиттал Темиртау» служат стали 08сп и 08пс.

В работе ставилась и решалась задача определить комплексные оценки качества горячекатаных полос толщиной 2 мм спокойного (FF) и

полуспокойного (FN) исполнения сталей марки S235JR, учитывающие требования к единичным показателям качества, изложенных в британском стандарте EN 10025-2:2004.

В таблицах 5.18 и 5.19 указаны требования по химическому составу и механическим свойствам горячекатаной стали марки S235JR.

Таблица 5.18 – Требования, предъявляемые к химическому составу горячекатаной стали марки S235JR по EN 10025-2:2004

Марка стали	Способ раскисления	Химический состав, %								
		C_{\max} , %			Si _{MAX}	Mn _{MAX}	P _{MAX}	S _{MAX}	N _{MAX}	Cu _{MAX}
		для номинальной толщины, мм								
		< 16	> 16	> 40						
S235JR	FN	0,19	0,19	0,23	-	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60
	FF	0,19	0,19	0,19	-	1,50	0,035	0,035	-	0,60

Таблица 5.19 – Требования, предъявляемые к механическим свойствам горячекатаной стали марки S235JR по EN 10025-2:2004

Марка стали	Способ раскисления	Механические свойства							
		Предел прочности σ_B , МПа		Удлинение δ_{\min} , %					
		номинальная толщина, мм		номинальная толщина, мм					
		< 3	3 ÷ 100	≤ 1	1 ÷ 1,5	1,5 ÷ 2	2 ÷ 2,5	2,5 ÷ 3	> 3
S235JR	FN	360 ÷ 510	360 ÷ 510	17	18	19	20	21	26
	FF	360 ÷ 510	360 ÷ 510	15	16	17	18	19	24

Комплексные оценки качества горячекатаных полос определяли суммированием оценок единичных показателей по уравнению (5.5).

Для полосы стали марки S235JR по способу раскисления (FF) без содержания ниобия использовали 11 единичных показателей.

Для полосы стали марки S235JR по способу раскисления (FN) без содержания ниобия использовали 12 единичных показателей.

Для полосы стали марки S235JR по способу раскисления (FN) с содержанием ниобия использовали 13 единичных показателей.

Фрагмент результатов исследований свойств горячекатаной полосы марки стали S235JR, предоставлены в таблице 5.20.

Дифференциальные оценки качества полосы, рассчитанные по единичным показателям в зависимости от способа раскисления и содержания ниобия, сведены в таблицы 5.21, 5.22, 5.23.

С использованием значений дифференциальных оценок качества единичных показателей определены комплексные оценки качества полос стали марки S235JR с учетом способа раскисления и содержания Nb:

- по способу раскисления FF без содержания ниобия $K_{01}=0,9453$;
- по способу раскисления FN без содержания ниобия $K_{02}=0,8711$.

Таблица 5.20 – Фрагмент данных исследований горячекатаной полосы марки стали S235JR

№ п/п	Марка стали	№ плавки	Способ раскисления	Требуемая толщина, мм	Фактическая толщина, мм	Химический состав, %										Механические свойства	
						C	Mn	Si	P	S	Cu	N	Al	V	Nb	σ_B , МПа	δ , %
1	S235JR	180187	FF	2	2,07	0,06	0,43	0,220	0,02	0,019	0,07	0,006	0,05	0	0	425	30
2	S235JR	180194	FF	2	2,12	0,07	0,47	0,230	0,025	0,006	0,06	0,006	0,03	0	0	435	33
3	S235JR	180194	FF	2	2,20	0,07	0,47	0,230	0,025	0,006	0,06	0,006	0,03	0	0	430	34
4	S235JR	180321	FN	2	2,06	0,06	0,53	0,097	0,014	0,019	0,04	0,004	0,043	0,005	0	405	33
5	S235JR	380334	FN	2	2,19	0,05	0,60	0,084	0,014	0,012	0,04	0,005	0,046	0,005	0	400	34
6	S235JR	180323	FN	2	2,05	0,05	0,64	0,096	0,024	0,009	0,04	0,004	0,042	0,005	0	400	36
.
82	S235JR	180953	FN	2	2,07	0,08	0,35	0,010	0,016	0,016	0,04	0,004	0,034	0,005	0,016	405	33

Таблица 5.21 – Дифференциальная оценка качества горячекатаной полосы стали марки S235JR, полученной по способу раскисления FF без содержания ниобия

Наименование показателя	Единичные показатели	Регламентированные значения		Дифференциальная оценка k_1
		r_{MAX}	r_{MIN}	
Геометрический параметр, мм	толщина	2,5	2	0,9761
Химический состав, %	<i>C</i>	0,190	0,0500	0,9868
	<i>Mn</i>	1,500	0,35	0,9999
	<i>Si</i>	0,370	0,17	1
	<i>P</i>	0,035	0,02	0,9474
	<i>S</i>	0,035	0,01	0,5196
	<i>Cu</i>	0,600	0,025	1
	<i>N</i>	0,014	0,005	1
Механические свойства	$\sigma_B, МПа$	510	360	1
	$\delta, \%$	∞	18	1

Таблица 5.22 – Дифференциальная оценка качества горячекатаной полосы стали марки S235JR, полученной по способу раскисления FN без содержания ниобия

Наименование показателя	Единичные показатели	Регламентированные значения		Дифференциальная оценка k_2
		r_{MAX}	r_{MIN}	
Геометрический параметр, мм	толщина	2,5	2	0,9015
Химический состав, %	<i>C</i>	0,190	0,050	0,8254
	<i>Mn</i>	1,500	0,350	0,9846
	<i>Si</i>	0,170	0,050	0,6458
	<i>P</i>	0,045	0,015	0,7611
	<i>S</i>	0,045	0,010	0,9192
	<i>Cu</i>	0,600	0,025	0,9279
	<i>N</i>	0,014	0,004	0,8365
	<i>Al</i>	∞	0,015	0,9999
Механические свойства	$\sigma_B, МПа$	510	360	0,9890
	$\delta, \%$	∞	20	0,9999

Таблица 5.23 – Дифференциальная оценка качества горячекатаной полосы стали марки S235JR, полученной по способу раскисления FN с содержанием ниобия

Наименование показателя	Единичные показатели	Регламентированные значения		Дифференциальная оценка
		r_{MAX}	r_{MIN}	
Геометрический параметр, мм	толщина	2,5	2	0,9803
Химический состав, %	<i>C</i>	0,190	0,050	0,8282
	<i>Mn</i>	1,500	0,350	0,9767
	<i>Si</i>	0,170	0,050	0,7078
	<i>P</i>	0,045	0,015	0,7794
	<i>S</i>	0,045	0,010	0,9162
	<i>Cu</i>	0,600	0,025	0,9177
	<i>N</i>	0,014	0,004	0,8485
	<i>Al</i>	∞	0,015	0,9999
	<i>V</i>	0,150	0,002	0,6808
	<i>Nb</i>	0,060	0,001	0,6255
Механические свойства	$\sigma_B, МПа$	510	360	0,9949
	$\delta, \%$	∞	20	0,9999

- по способу раскисления FN с содержанием ниобия $K_{03}=0,8658$.

Из сопоставления комплексных оценок со шкалой желательности (таблица 5.24) [11], следует, что качество полос во всех исследованных случаях соответствует эталонному уровню.

Таблица 5.24 – Шкала желательности

Безразмерная шкала	Показатель K_0	Уровень качества
Очень хорошо	0,80...1,00	Эталон
Хорошо	0,63...0,80	Высший сорт
Удовлетворительно	0,37...0,63	Первый сорт
Плохо	0,20...0,37	Второй сорт
Очень плохо	0,00...0,20	Брак

6 Математическое моделирование ресурса пластичности металла при горячей прокатке на НШПС-1700

6.1 Алгоритм и структура математической модели

Построение математической модели пластического течения при прокатке требует: описания реологических свойств металла; постановки краевой задачи и выбора метода её решения; реализации алгоритма в виде программы для ЭВМ. Заметим, что при расширяющемся использовании для решения задач прокатки эффективного, но весьма сложного метода конечных элементов вполне естественно стремление к применению относительно простых методов, каковым является метод конечных разностей. Наряду с простотой и универсальностью, он характеризуется ясностью физической интерпретации, достаточно строгим математическим обоснованием, алгоритмичностью, возможностью использования хорошо разработанного аппарата линейной алгебры.

Для решения указанных задач воспользуемся работами А. В. Ноговицына [17-21], Г. И. Капланова [22-24].

Для описания реологических свойств металла достаточно широко применяется вязко-пластическая модель:

$$S_{i,j} = \left(\mu + \frac{K}{H} \right) \dot{\epsilon}_{i,j}, \quad (6.1)$$

где $S_{i,j}$ – девиатор напряжений;

μ – динамическая вязкость;

K – сопротивление сдвигу;

H – интенсивность скоростей деформаций;

$\dot{\epsilon}_{i,j}$ – тензор скоростей деформаций.

Вязко-пластическая среда (6.1) называется средой Бингема, она объединяет в себе свойства линейно-вязкой жидкости и идеально-пластического тела и может рассматриваться как нелинейная вязкая жидкость с эквивалентной вязкостью:

$$\mu' = \mu + \frac{K}{H}. \quad (6.2)$$

При $\dot{\epsilon} < 10 \text{ c}^{-1}$ вязко-пластическую среду можно рассматривать как идеально-пластическое тело; при $\dot{\epsilon} < 30 \text{ c}^{-1}$ влияние μ и K/H на μ' сопоставимо и среда является вязко-пластической; при $\dot{\epsilon} > 30 \text{ c}^{-1}$ вязкие свойства среды преобладают и она ведет себя как линейно-вязкая жидкость.

Пластическая деформация металла может быть описана уравнениями движения вязкой жидкости с коэффициентом вязкости:

$$\mu' = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_T}{H}, \quad (6.3)$$

где σ_T – сопротивление деформации.

Пластометрические испытания различных сталей позволяют определить предел текучести σ_T с учетом деформационного и скоростного упрочнений, например, по эмпирическим зависимостям вида:

$$\sigma_T = A \cdot \varepsilon^a \cdot \dot{\varepsilon}^b \cdot e^{-ct}, \quad (6.4)$$

где A, a, b, c – константы, зависящие от марки стали;

$\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ – обжатие и скорость деформации;

t – температура металла.

Стационарное напряженно-деформированное состояние при плоской прокатке определяется тремя компонентами тензора напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ и двумя компонентами вектора скорости V_x, V_y , которые удовлетворяют следующим дифференциальным уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (6.6)$$

Составляющие дивергенции напряжений исключаются из уравнений равновесия (6.5) путем подстановки вязко-пластической модели (6.1):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (\mu' \dot{\varepsilon}_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu' \dot{\gamma}_{xy}); \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} (\mu' \dot{\gamma}_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu' \dot{\varepsilon}_x). \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

Для отделения нахождения компонент вектора скорости V_x и V_y от давления p первое уравнение системы (6.7) дифференцируется по y , а второе по x , и затем из первого уравнения вычитается второе:

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\mu' \dot{\varepsilon}_x) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\mu' \dot{\gamma}_{xy}) - \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\mu' \dot{\gamma}_{xy}) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\mu' \dot{\varepsilon}_x) = 0. \quad (6.8)$$

Вводится функция напряженности вихря, которая определяет мгновенную скорость вращения материальной частицы в каждой точке очага деформации:

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right). \quad (6.9)$$

Тогда с помощью тождественных равенств:

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \dot{\gamma}_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{\epsilon}_x}{\partial y}; \quad \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\partial \dot{\epsilon}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{\gamma}_{xy}}{\partial y}$$

уравнение (6.8) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu' \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu' \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\dot{\gamma}_{xy} \frac{\partial \mu'}{\partial x} - \dot{\epsilon}_x \frac{\partial \mu'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\dot{\epsilon}_y \frac{\partial \mu'}{\partial x} - \dot{\gamma}_{xy} \frac{\partial \mu'}{\partial y} \right) = 0. \quad (6.10)$$

Скорости течения металла V_x , V_y выражаются через функцию тока ψ , тождественно удовлетворяющую условию несжимаемости (6.6):

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V_y = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (6.11)$$

Подстановкой (6.11) в выражение (6.9) получается дифференциальное уравнение для функции тока:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + 2\omega = 0. \quad (6.12)$$

Таким образом, решение систем (6.5) – (6.6) сводится к решению двух уравнений (6.10) и (6.12), затем по формулам (6.11) определяются скорости V_x и V_y , по дифференциальным соотношениям (6.7) – гидростатическое давление p , а по формулам (6.1) находится девиатор напряжений в каждой точке геометрического очага деформации.

Систему дифференциальных уравнений (6.10) и (6.12), описывающих вязко-пластическое течение металла при деформации, удобно решать в ортогональной системе координат, в которой геометрические границы очага деформации совпадали бы с координатными линиями. Это позволяет существенно упростить задание граничных условий и численное решение задачи. Для случая прокатки такой криволинейной ортогональной системой координат является биполярная система координат. Связь декартовых

координат x и y с биполярными ξ и η (рисунок 2.1) выражается соотношениями:

$$x = \frac{a \cdot \sin \xi}{ch\eta - \cos \xi}; \quad y = \frac{a \cdot sh\eta}{ch\eta - \cos \xi}, \quad (6.13)$$

где a – расстояние от начала декартовых координат по оси OY до полюса F .

Линии $\xi=const$ являются окружностями, включающими хорду FF' , линии $\eta=const$ – ортогональными окружностями, радиусы которых выражаются формулой:

$$r = \pm \frac{a}{sh\eta}, \quad (6.14)$$

а центры лежат на оси OY на расстоянии l от начала координат O :

$$l = a \cdot ch\eta. \quad (6.15)$$

Геометрический очаг деформации со стороны входа ограничен координатой ξ_0 , со стороны выхода – координатой ξ_1 . Окружности валков являются координатными линиями $\pm\eta_0$.

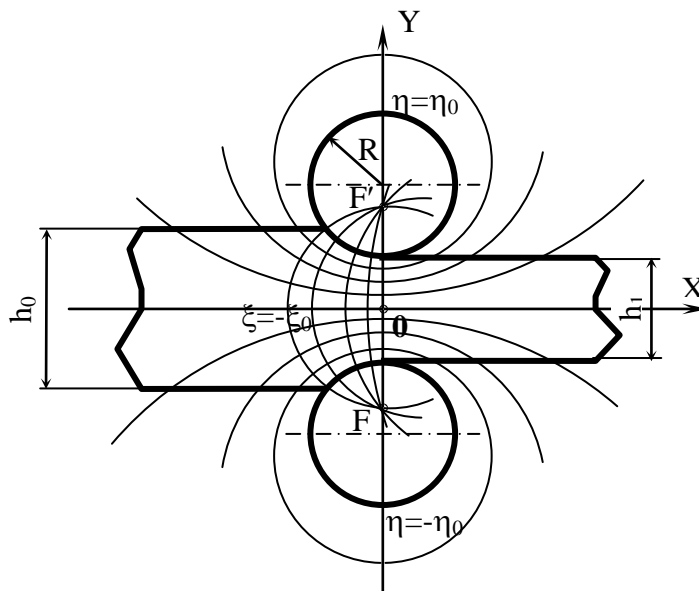


Рисунок 6.1 – Схема прокатки в биполярной системе координат

Формулы для определения a , η_0 и ξ_0 получены следующим образом. Из (6.14), (6.15) следует:

$$R = \frac{a}{sh\eta_0}; (R + h_1) = a \cdot ch\eta_0. \quad (6.16)$$

После деления второго равенства из (6.16) на первое:

$$\frac{R + h_1}{R} = ch\eta_0. \quad (6.17)$$

Из (6.17) получается выражение для η_0 :

$$\eta_0 = \ln \left(1 + \frac{h_1}{R} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{h_1}{R} \right)^2 - 1} \right), \quad (6.18)$$

где h_1 – толщина полосы на выходе из очага деформации.

Очевидно, что на оси симметрии очага деформации ($y=0$) координата $\eta=0$. Подстановкой во второе выражение (6.13) $y=h_0$ и $\eta=\eta_0$ получается формула для определения входной границы геометрического очага деформации:

$$\xi_0 = \arccos \left(ch\eta_0 - a \frac{sh\eta_0}{h_0} \right), \quad (6.19)$$

где h_0 – толщина полосы на входе в очаг деформации.

На выходе из очага деформации ($\xi=\xi_1$) координата ξ равна $-\pi$.

С целью получения формулы для определения величины a возводится в квадрат первое равенство (6.16) и выражение (6.17) и вычитается одно из другого:

$$sh^2\eta_0 - ch^2\eta_0 = \left(1 + \frac{h_1}{R} \right)^2 - \frac{a^2}{R^2}. \quad (6.20)$$

Левая часть полученного выражения тождественно равна единице. Учитывая это, несложные преобразования дают:

$$a = \sqrt{h_1(2R + h_1)}. \quad (6.21)$$

Последовательность графического построения биполярной системы координат такова. После определения межфокусного расстояния $2a$ отмечают на оси OY точки F и F' и проводят через них серию окружностей с центрами на оси OX . Затем, изменяя координату η от 0 до η_0 , с выбранным

шагом, определяют радиусы ортогональных окружностей r ($R \leq r < \infty$) по формуле (6.14) и местонахождение центров этих окружностей на оси OY по формуле (6.15). После проведения этого семейства окружностей построение криволинейной системы координат заканчивают.

Геометрический очаг деформации в биполярной системе координат представляет собой криволинейную ортогональную область $\{0 \leq \eta \leq \eta_0, -\pi \leq \xi \leq \xi_0\}$.

Основная система кинематических уравнений в биполярных координатах приобретает вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + 2H^2 \omega = 0; \quad (6.22)$$

$$\frac{\partial^2 (\mu' \omega)}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 (\mu' \omega)}{\partial \eta^2} = 0. \quad (6.23)$$

Для расчета напряжений в очаге деформации используются выражения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \xi} &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \xi} (H \mu' \dot{\varepsilon}_\xi) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \eta} (H \mu' \dot{\gamma}_{\xi\eta}) + \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \eta} \mu' \dot{\gamma}_{\xi\eta} - \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \xi} \mu' \dot{\varepsilon}_\eta; \\ \frac{\partial p}{\partial \eta} &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \eta} (H \mu' \dot{\varepsilon}_\eta) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \xi} (H \mu' \dot{\gamma}_{\xi\eta}) + \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \xi} \mu' \dot{\gamma}_{\xi\eta} - \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \eta} \mu' \dot{\varepsilon}_\xi. \end{aligned} \right\} \quad (6.24)$$

Для упрощения выражений (6.24) и увеличения точности расчета p вводится напряженность вихря ω . Для этого использованы соотношения Коши-Римана, для линейно-вязкой среды ($\mu' = \text{const}$):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \xi} &= -\mu' \frac{\partial \omega}{\partial \eta}; \\ \frac{\partial p}{\partial \eta} &= \mu' \frac{\partial \omega}{\partial \xi}. \end{aligned} \right\} \quad (6.25)$$

При $\mu' = \mu'(\xi, \eta)$ к уравнениям (6.25) следует добавить члены с частными производными $\frac{\partial \mu'}{\partial \xi}$ и $\frac{\partial \mu'}{\partial \eta}$, которые получаются в правой части выражений (6.24):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \xi} &= -\mu' \frac{\partial \omega}{\partial \eta} + \frac{\partial \mu'}{\partial \xi} \dot{\varepsilon}_\xi + \frac{\partial \mu'}{\partial \eta} \dot{\gamma}_{\xi\eta}; \\ \frac{\partial p}{\partial \eta} &= \mu' \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + \frac{\partial \mu'}{\partial \eta} \dot{\varepsilon}_\eta + \frac{\partial \mu'}{\partial \xi} \dot{\gamma}_{\xi\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (6.26)$$

После введения следующих безразмерных величин:

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= \frac{\xi + \pi}{\xi_0 + \pi}; \quad \bar{\eta} = \frac{\eta}{\xi_0 + \pi}; \quad \bar{V}_\xi = \frac{V_\xi - V_B}{V_B}; \quad \bar{V}_\eta = \frac{V_\eta}{V_B}; \quad \bar{\psi} = \frac{\psi}{a \cdot V_B (\xi_0 + \pi)}; \\ \bar{H} &= \frac{H}{a}; \quad \bar{\omega} = \frac{a(\xi_0 + \pi)}{V_B} \omega; \quad \bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{a(\xi_0 + \pi)}{V_B} \dot{\varepsilon}; \quad \bar{p} = \frac{p}{k} \end{aligned}$$

уравнения (6.22), (6.23) и (6.26) примут вид:

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{\xi}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{\eta}^2} + 2\bar{H}^2 \bar{\omega} = 0; \quad (6.27)$$

$$\frac{\partial^2 \left[\left(Se + \frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \bar{\omega} \right]}{\partial \bar{\xi}^2} + \frac{\partial^2 \left[\left(Se + \frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \bar{\omega} \right]}{\partial \bar{\eta}^2} = 0; \quad (6.28)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \bar{\xi}} &= - \left(Se + \frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{\eta}} + \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left(\frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \bar{\dot{\varepsilon}}_\xi + \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} \left(\frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \bar{\dot{\gamma}}_{\xi\eta}; \\ \frac{\partial p}{\partial \bar{\eta}} &= \left(Se + \frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{\xi}} + \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} \left(\frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \bar{\dot{\varepsilon}}_\eta + \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left(\frac{1}{\bar{\dot{\varepsilon}}} \right) \bar{\dot{\gamma}}_{\xi\eta}, \end{aligned} \right\} \quad (6.29)$$

где $Se = \frac{\mu \cdot V_B}{k \cdot a(\xi_0 + \pi)}$ – видоизмененный критерий Сен-Венана.

Система уравнений (6.27), (6.28) решается конечно-разностным методом. Область интегрирования $\bar{\Omega}$ представляет собой криволинейный прямоугольник: $\bar{\Omega} = \{0 \leq \bar{\xi} \leq \bar{\xi}_0, 0 \leq \bar{\eta} \leq \bar{\eta}_0\}$. Сторона $0 \leq \bar{\xi} \leq \bar{\xi}_0$ разбивается на N равных частей с шагом $h = \bar{\xi}_0 / N$, а сторона $0 \leq \bar{\eta} \leq \bar{\eta}_0$ на M частей с шагом $d = \bar{\eta}_0 / M$. Из полученных точек проводится два семейства координатных кривых. Точки пересечения этих кривых (ξ_i, η_j) являются узлами разностной сетки, причем $\xi_i = i \cdot h$ и $\eta_j = j \cdot d$, где $i = 0, 1, \dots, N$; $j = 0, 1, \dots, M$. Полученная сетка имеет равномерный шаг по каждой переменной.

Замена каждой из первых и вторых производных, входящих в уравнения (6.27), (6.28) и (6.29), разностными уравнениями вида:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \approx \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{h^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial \eta} \approx \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{d},$$

приводит дифференциальные уравнения (6.27) и (6.28) к следующим разностным аналогам:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{d^2} + 2H_{i,j}^2 \omega_{i,j} &= 0; \\ \frac{(\bar{\mu}\omega)_{i+1,j} - 2(\bar{\mu}\omega)_{i,j} + (\bar{\mu}\omega)_{i-1,j}}{h^2} + \frac{(\bar{\mu}\omega)_{i,j+1} - 2(\bar{\mu}\omega)_{i,j} + (\bar{\mu}\omega)_{i,j-1}}{d^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.30)$$

При замене дифференциальных уравнений разностными возникает погрешность аппроксимации, которая характеризуется величиной невязки и определяется при подстановке точного решения исходной задачи в разностную.

Для одной и той же дифференциальной задачи можно построить различные разностные схемы. Наиболее простой алгоритм для разностного решения имеют явные схемы, для которых, однако, характерны некоторые недостатки, например, ограничения по устойчивости и сходимости. Выполнение требований устойчивости и сходимости приводит к необходимости мелкой дискретизации итерационной переменной и увеличивает время счета.

Неявные разностные схемы лишены этого недостатка. Они допускают независимый выбор шагов сетки, однако, требуют решать систему алгебраических уравнений. Число уравнений и неизвестных в такой системе очень велико – пропорционально h^q , где q – число независимых переменных.

Одним из методов решения стационарных задач является метод установления. Сущность его заключается в том, что исследуемое равновесное состояние рассматривают как результат установления развивающегося во времени процесса, расчет которого часто оказывается проще, чем прямой расчет равновесного состояния.

Метод установления предполагает решение следующей нестационарной задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + 2H^2 \omega; \\ \frac{\partial (\bar{\mu}\omega)}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 (\bar{\mu}\omega)}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 (\bar{\mu}\omega)}{\partial \eta^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6.31)$$

которая приводит к получению явной разностной схемы:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{i,j}^{P+1} &= \psi_{i,j}^P + \tau \left[\frac{\psi_{i+1,j}^P - 2\psi_{i,j}^P + \psi_{i-1,j}^P}{h^2} + \frac{\psi_{i,j+1}^P - 2\psi_{i,j}^P + \psi_{i,j-1}^P}{d^2} + 2H_{i,j}^2 \omega_{i,j} \right]; \\ \omega_{i,j}^{P+1} &= \omega_{i,j}^P + \frac{\tau}{\mu_{i,j}} \left[\frac{(\bar{\mu}\omega)_{i+1,j}^P - 2(\bar{\mu}\omega)_{i,j}^P + (\bar{\mu}\omega)_{i-1,j}^P}{h^2} + \frac{(\bar{\mu}\omega)_{i,j+1}^P - 2(\bar{\mu}\omega)_{i,j}^P + (\bar{\mu}\omega)_{i,j-1}^P}{d^2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (6.32)$$

где P – номер итерации;
 τ – итерационный параметр.

Известно, что явная разностная схема (6.32) является устойчивой и сходится при условии:

$$\tau \leq \frac{l^2}{4 \max \mu_{i,j}}, \quad (6.33)$$

где l – минимальный шаг сетки ($l = \min\{h, d\}$).

Из условия (6.33) следует, что с увеличением вязкой составляющей сопротивления деформации итерационный параметр увеличивается и достигает максимального значения $l^2/4$ для линейно-вязкой задачи. Для идеально-пластической среды ($\tau \rightarrow \infty$) разностная схема (6.32) становится абсолютно неустойчивой.

Для решения системы разностных уравнений (6.32) выбран итерационный метод Зейделя, сущность которого заключается в том, что на очередном итерационном шаге в правой части уравнений, наряду со значениями ψ^P и ω^P , полученными в предыдущем итерационном цикле, используются значения ψ^{P+1} и ω^{P+1} , рассчитанные на данном итерационном шаге. Итерационный процесс решения системы (6.32) начинается с задания первого приближения для функции тока и напряженности вихря. За первое приближение принимается линейное распределение функции тока вдоль координаты ξ от значения ψ и ω на границах $\eta=0$ до значений $\psi=\psi(\xi, \eta_0)$, $\omega=\omega(\xi, \eta_0)$. Расчет заканчивается после выполнения условия сходимости:

$$\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\left| \frac{\psi_{i,j}^P - \psi_{i,j}^{P+1}}{\psi_{i,j}^P} \right| + \left| \frac{\omega_{i,j}^P - \omega_{i,j}^{P+1}}{\omega_{i,j}^P} \right| \right) < \Delta. \quad (6.34)$$

Решение системы разностных уравнений (6.32) позволяет получить матрицу значений функции тока в узлах разностной сетки. Путем численного дифференцирования табличных данных функции тока можно с помощью разностных аналогов формулы движения вязкой жидкости получить значения компонент скорости течения в узлах разностной сетки и далее определить скорости деформации.

Для описания упрочнения, анализа и разрушения деформируемого металла необходимо определить степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \int_0^{\tau} H d\tau. \quad (6.35)$$

Интегрирование необходимо выполнять вдоль всей траектории материальной частицы от ее входа в очаг деформации ($\tau=0$) до выхода ($\tau=\tau_1$). Применение биполярной системы координат существенно облегчает эту задачу, поскольку координатные линии η достаточно близки к линиям тока. В этой связи степень деформации Λ определяется численным интегрированием вдоль координаты η , причем шаг интегрирования определяли по формуле:

$$\Delta\tau_{i,j} = \frac{hN_{i,j}}{V_{\xi i,j}}. \quad (6.36)$$

Согласно (6.1) для определения напряженного состояния необходимыми кинематическими параметрами являются скорости деформации и, в случае упрочняющейся среды, степень деформации сдвига Λ .

На первом этапе расчета напряженного состояния в очаге деформации определяется гидростатическое давление на линии симметрии очага деформации. Поскольку на линии симметрии $\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \eta} = 0$ и $\dot{\gamma}_{\xi\eta} = 0$, а членом $\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \xi} \cdot \dot{\epsilon}_{\xi}$ можно пренебречь, то расчет p на линии симметрии осуществляется по уравнению:

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} = -\bar{\mu} \frac{\partial \omega}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \xi} \cdot \dot{\epsilon}_{\xi}. \quad (6.37)$$

После определения значений гидростатического давления на линии симметрии очага деформации ($\eta=0$), по второму уравнению системы (6.29), находится распределение P в остальных узлах разностной сетки.

Описанный метод расчета позволяет определить поле давления в плоском очаге деформации с точностью до некоторой постоянной величины, которая является граничным условием для P на оси симметрии.

Область интегрирования представляет собой половину геометрического очага деформации и ограничена координатными линиями $\eta=0$ (ось симметрии), $\eta=\eta_0$ (дуга окружности валка), $\xi=\xi_0$ (входное сечение), $\xi=-\pi$ (выходное сечение). Значения и выражения для функции тока ψ и

напряженности вихря ω на указанных границах определяются следующим образом.

Линия симметрии ($\eta=0$).

Вдоль оси симметрии течения принято полагать, что функция тока должна иметь постоянное значение. Поскольку функция тока с физической точки зрения представляет собой расход металла между линиями тока, то для выбранной системы отсчета естественно положить, что:

$$\psi|_{\eta=0} = 0. \quad (6.38)$$

Граничное условие для вихря имеет также простой вид. На всей центральной линии $V_{\eta}=0$ и поэтому $\frac{\partial V_{\eta}}{\partial \xi} = 0$. Поскольку скорость V_{ξ} симметрична относительно линии $\eta=0$, то $\frac{\partial V_{\xi}}{\partial \eta} = 0$. Учитывая симметричность параметра Лямэ, из соотношения (6.30) следует, что:

$$\omega|_{\eta=0} = 0.$$

Линия контакта металла с валком ($\eta=\eta_0$).

Если учесть, что поверхность валка непроницаема для прокатываемого металла, то значение функции тока на ней должно соответствовать половине расхода (Q) металла в данном (ξ) сечении очага деформации:

$$\psi|_{\eta=\eta_0} = -\frac{1}{2}Q(\xi). \quad (6.39)$$

Расход в каждом поперечном сечении очага деформации определяется по следующей формуле:

$$Q(\xi) = V_{\delta} \int_0^{\eta_0} [H(\xi_H, \eta) - H(\xi, \eta)] d\eta, \quad (6.40)$$

где ξ_H – нейтральное сечение.

Выбранный подход решения задачи пластического течения с кинематическими граничными условиями привел к необходимости введения несколько отличной от известных трактовки «нейтрального» сечения (ξ_H). Предлагается под «нейтральным» сечением очага деформации понимать такое сечение, в котором относительный расход металла равен нулю, т.е. $Q(\xi_H) = 0$. Сечение, в котором контактные касательные напряжения равны нулю, называется «критическим».

Формулу для расчета вихря на границе металла с валком можно получить разложением функции тока ψ в окрестности точки (ξ, η_0) :

$$\psi(\xi, \eta_0 - d) \approx \psi(\xi, \eta_0) + \left. \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right|_{\xi, \eta_0} d + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} \right|_{\xi, \eta_0} d^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta^3} \cdot d^3.$$

С учетом того, что:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = HV_{\xi}; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - 2H^2 \omega;$$

$$\frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta^3} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - 2H^2 \omega \right); \quad \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta \partial \xi^2} = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} (-HV_{\eta}),$$

в разностной форме имеем:

$$\begin{aligned} \omega_{i,M} = & \frac{3}{2H_{i,M}^2} \cdot d^2 (\psi_{i,M-1} - \psi_{i,M}) - \frac{3}{2H_{i,M}} V_{\xi i,M} + \frac{3}{4H_{i,M}^2} \frac{\psi_{i+1,M} - 2\psi_{i,M} \psi_{i-1,M}}{h^2} + \\ & + \frac{d}{4H_{i,M}^2} \frac{(HV_{\eta})_{i+1,M} - 2(HV_{\eta})_{i,M} + (HV_{\eta})_{i,M}}{h^2} - \frac{\omega_{i,M-1}}{2}. \end{aligned} \quad (6.41)$$

Граничное условие (6.41) решающим образом определяет характер пластического течения в очаге деформации, достоверность которого зависит от правильности задания скорости $V_{\xi i,M}$ на линии контакта металла с валком. В зоне прилипания относительное скольжение металла отсутствует и $V_{\xi i,M} = 0$ для $\xi' < \xi < \xi''$, где ξ', ξ'' – границы зоны прилипания. Труднее определить скорость V_{ξ} на участках скольжения в зонах отставания и опережения.

Во-первых, заранее неизвестны положение и протяженность зоны прилипания, во-вторых, неизвестен характер изменения скорости на участках скольжения.

Протяженность зоны прилипания зависит от геометрии очага деформации, условий контакта и свойств прокатываемого металла. Из-за недостатка экспериментальных данных, позволяющих заранее определить протяженность и положение зоны прилипания на дуге контакта во всех случаях прокатки, границы зоны прилипания приходится определять в ходе решения задачи.

Необходимым условием наличия зоны прилипания является неравенство касательных напряжений в поверхностном слое деформируемого металла силам трения покоя на контакте его с валком.

Причем величина касательных напряжений в зоне прилипания должна быть меньше сил трения покоя. Как только это условие нарушается, наступает скольжение металла.

Силы трения покоя определяются выражением:

$$\tau_{mp} = f_{II} P_r, \quad (6.42)$$

где f_{II} – коэффициент трения покоя;

P_r – нормальная нагрузка.

Алгоритм поиска зоны прилипания следующий. На первом этапе расчетов принимается заведомо большая длина зоны прилипания или полагается, что прилипание имеет место на всей длине дуги контакта. После определения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации проверяется условие прилипания по длине дуги контакта:

$$\tau_{\xi\eta}|_{\eta=\eta_0} \leq f_{II} \cdot \sigma_{\eta}|_{\eta=\eta_0}. \quad (6.43)$$

В случае невыполнения условия (6.43) протяженность зоны уменьшается и снова рассчитываются напряжения и деформации. Эта процедура продолжалась до тех пор, пока условие не выполнится для всех точек дуги контакта.

В качестве гипотетической зависимости принимаются следующие формулы для расчета скорости скольжения:

$$V_{\xi i, M} = \frac{Q(\xi_i^n)}{l(\xi_i^n)}, \quad (6.44)$$

где $\xi_i^n = \frac{(\xi_{HP} - \xi_0)(\xi_i - \xi_0)}{(\xi' - \xi_0)} + \xi_0$ – для зоны отставания;

$\xi_i^n = \frac{\xi_{HP} \cdot \xi_i}{\xi''}$ – для зоны опережения;

$l(\xi)$ – длина криволинейного поперечного сечения ξ .

Входное и выходное сечения ($\xi = \xi_0$; $\xi = \xi_1$).

Постановка кинематических граничных условий в сечении входа и выхода очага деформации, особенно для случая прокатки высоких полос, затруднена из-за того, что пластическая деформация металла начинается значительно раньше входного сечения геометрического очага деформации. Даже применение биполярной системы координат не позволяет полностью охватить пластическую область. В этой связи возникает трудность в задании кинематических граничных условий на входной и выходной границах очага деформации.

Предполагается, что за пределами геометрического очага

деформации, рассматриваемого в биполярной системе координат, прокатываемый металл является твердым телом, т.е. в сечениях входа и выхода очага деформации вертикальные (V_η) скорости металла равны нулю, а горизонтальные (V_ξ) – постоянны по высоте полосы. Значения ψ и ω определяются следующим образом:

$$\psi = \int_0^\eta H \cdot V_\xi d\eta, \quad \omega = 0. \quad (6.45)$$

В качестве граничных условий типа Неймана приняты:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial \xi} = 0. \quad (6.46)$$

Влияние «полужестких» граничных условий:

$$\begin{aligned} \psi &= \int_0^\eta H \cdot V_\xi d\eta; \\ \omega &= -\frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} \cdot \frac{1}{2H^2}. \end{aligned} \quad (6.47)$$

После расчета кинематики вязко-пластического течения можно найти распределение температуры в очаге деформации. Стационарное температурное поле в биполярной системе координат можно описать следующим уравнением:

$$\frac{1}{H^2} \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} \right) - \frac{1}{H} V_\eta \frac{\partial t}{\partial \xi} - \frac{1}{H} V_\xi \frac{\partial t}{\partial \eta} = -\frac{E}{Re} \Phi, \quad (6.48)$$

где Pe , E , Re – числа Пекле, Еккерта, Рейнольдса;
 t – безразмерная температура металла;
 $\Phi = 2\varepsilon^2$.

Причем:

$$Pe = Pr \cdot Re = \frac{C_p \mu'}{Kp} \cdot \frac{\rho \cdot V_\xi \cdot a(\xi_0 + \pi)}{\mu'}, \quad (6.49)$$

$$\frac{E}{Re} = \frac{V_\xi^2}{C_p (t_m - t_\xi)} \cdot \frac{\mu'}{\rho \cdot V_\xi \cdot a(\xi_0 + \pi)}, \quad (6.50)$$

где Pr – число Прандтля;

K_p – коэффициент теплопроводности металла;
 C_p – теплоемкость металла;
 t_m – некоторое базовое значение температуры металла перед прокаткой;
 t_b – температура валка;
 ρ – плотность металла.

Граничные условия для температуры применяются следующие. На входной границе очага деформации температура имеет некоторое, известное заранее, распределение по высоте прокатываемой полосы:

$$t|_{\xi=\xi_0} = t_0(\eta); \quad (6.51)$$

на оси симметрии:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = 0; \quad (6.52)$$

на выходной границе очага деформации:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_1} = 0; \quad (6.53)$$

на границе металла с валком:

$$-\left. \frac{\partial t}{\partial \eta} \right|_{\eta=\eta_0} = C \frac{t - t_b}{t_m - t_b}, \quad (6.54)$$

где C – относительный коэффициент теплообмена.

До тех пор пока деформация, накопленная частицей деформируемого металла, не достигнет предельной величины Λ_p , разрушения металла не произойдет. Таким образом, условие деформирования без разрушения в современной феноменологической теории разрушения записывается в виде:

$$\Lambda < \Lambda_p \text{ или } \psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p} < 1. \quad (6.55)$$

Величину ψ называют степенью использования ресурса пластичности. Теоретически в момент разрушения $\psi = 1$. Однако, если учитывать историю предварительной обработки металла, эта величина может уменьшаться до 0,7 – 0,8.

Таким образом, при определении деформируемости металла необходимо для отдельных, характерных частиц прокатываемого тела подсчитать накопленную степень деформации по (6.35) при движении по линии тока, затем определить Λ_p и проверить условие (6.55).

Предельную степень деформации Λ_p определяют экспериментальными методами при растяжении круглых образцов с выточкой или при кручении, а также при проведении опытов по осадке цилиндрических образцов, имеющих различное поперечное сечение. Результаты опытов обычно представляют в виде диаграмм пластичности. Современная теория располагает инженерными зависимостями для расчёта Λ_p типа:

для стали Ст3

$$\Lambda_p = 2,58 + 3,1\left(\frac{Q}{1000}\right)^2 - 0,73\left(\frac{Q}{1000}\right)\ln \xi_n - 0,64\left(\frac{\sigma}{T}\right) + 0,1\left(\frac{\sigma}{T}\right)\ln \xi_n; \quad (6.56)$$

для стали Ст5

$$\Lambda_p = \xi_n^{-1,18+0,072\frac{\sigma}{T}} \exp\left[1,31 + 1,35\left(\frac{Q}{1000}\right) - 1,91\frac{\sigma}{T} + 0,85\left(\frac{Q}{1000}\right)\frac{\sigma}{T}\right]; \quad (6.57)$$

для стали Ст45

$$\Lambda_p = \xi_n^{-1,9+0,08\frac{\sigma}{T}} \exp\left[1,31 + 1,35\left(\frac{Q}{1000}\right) - 1,84\frac{\sigma}{T} + 0,93\left(\frac{Q}{1000}\right)\frac{\sigma}{T}\right]; \quad (6.58)$$

для стали 09Г2

$$\Lambda_p = \exp\left[0,0024Q - 0,16\frac{\sigma}{T} - 0,01\xi_n - 0,81\right], \quad (6.59)$$

где Q – температура металла;

$\xi_n = \frac{1}{\sqrt{3}}H$ – скорость деформации.

Значения констант A , a , b , c в формуле (6.4) для определения сопротивления деформации некоторых марок сталей приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Значение термомеханических коэффициентов

Материал	Коэффициенты			
	A	a	b	c
Малоуглеродистая сталь 08кп	49	0,229	0,177	0,0024
Углеродистая сталь 45	133	0,257	0,143	0,0025
Нержавеющая сталь X18Н9Т	325	0,280	0,087	0,0028

Значение термомеханических коэффициентов, входящих в эмпирическую формулу Л. В. Андреюка и Г. Г. Тюленева для 66 марок стали, а также эмпирические формулы для определения сопротивления деформации по В. Н. Зюзину представлены в работе [25].

С использованием изложенного алгоритма, по блок-схеме, изображенной на рисунке 6.2, составлена компьютерная программа моделирования ресурса пластичности металла и других параметров горячей прокатки на широкополосном стане. Программа составлена на языке Quick Basic. Идентификаторы программы приведены в таблице 6.2.

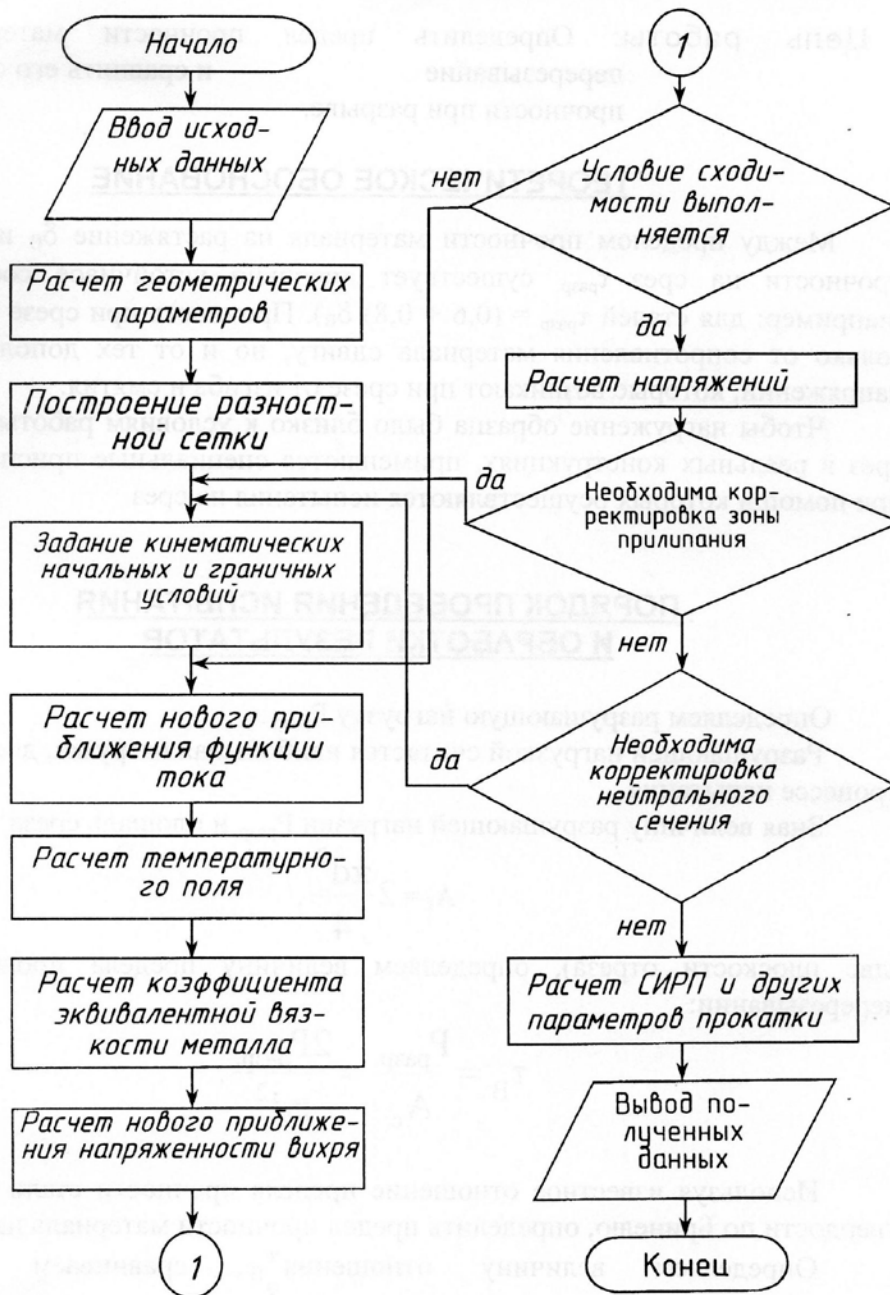


Рисунок 6.2 – Блок-схема алгоритма моделирования

Таблица 6.2 – Идентификаторы программы

№ п/п	Обозначение величины		Расшифровка обозначения
	матем.	в progr.	
1	R	R	Радиус валка, м
2	h_0	H0	1/2 начальной толщины полосы, м
3	h_1	H1	1/2 конечной толщины полосы, м
4	$V_в$	V	Скорость прокатки, м/с
5	$t_{изм}$	TUM	Температура центрального слоя металла, °С
6	K	K	Сопротивление чистому сдвигу, МПа
7	μ	K1	Коэффициент динамической вязкости, МПа
8	N	N	Число узлов разностной сетки по координате ξ
9	M	M	Число узлов разностной сетки по координате η
10	i, j	I, J	Переменные циклов по координатам ξ и η соответственно
11	τ	C	Итерационный параметр
12	Δ	C1,C3,C4	Точность итерационного процесса Либмана
13	C	C2	Коэффициент, зависящий от скорости прокатки
14	$t_в$	TV	Температура валка, °С
15	K	KP	Коэффициент теплопроводности металла, Вт/мК
16	C	CP	Теплоемкость металла кДж/кг·К
17	ρ	RO	Плотность металла, кг/м ³
18	α	ALF	Угол захвата, рад
19	f_{mp}	FTR	Коэффициент трения покоя
20	Λ_p	LBR	Предельная деформация сдвига
21	Δh	DH	Изменение толщины, м
22	h_{cp}	HS	Средняя высота очага деформации, м
23	ε	E	Относительное обжатие, %
24	l_d	LA	Длина дуги контакта, м
25	l_d/h_{cp}	LAS	Параметр (фактор) формы
26	λ	L	Коэффициент обжатия
27	t_{nm}	TNM	Температура поверхности металла, °С
28	a	A1	Расстояние от начала декартовых координат по оси OX до полюса F

Продолжение таблицы 6.2

№ п/п	Обозначение величины		Расшифровка обозначения
	матем.	в progr.	
29	$\eta_{(10)}$	P(M-1)	Линия контакта металла с валком
30	$\eta_{(1)}$	P(1)	Линия симметрии очага деформации
31	$\xi_{(10)}$	KS(N-1)	Входная граница очага деформации
32	$\xi_{(1)}$	KS(1)	Выходная граница очага деформации
33	η_j	P(J)	Семейство окружностей с центрами на оси OY
34	ξ_i	KS(I)	Семейство окружностей с центрами на оси OX
35	$\bar{\xi}_i$	KSB(I)	Безразмерная величина
36	$\bar{\eta}_j$	PB(J)	Безразмерная величина
37	h	H	Шаг по координате ξ
38	d	D	Шаг по координате η
39	\bar{h}	HB	Безразмерная величина
40	\bar{d}	DB	Безразмерная величина
41	$\psi_{i,j}$	F(I, J)	Функция тока по оси симметрии очага деформации
42	$\bar{\psi}_{i,j}$	KF(I, J)	Безразмерная величина
43	$t_{i,j}$	T(I, J)	Температура в узлах разностной сетки, °C
44	$\bar{t}_{i,j}$	KT(I, J)	Безразмерная величина
45	$\bar{t}_{i,1}$	KT(I, 1)	Безразмерная величина
46	$\bar{t}_{i,m-1}$	KT(I, M-1)	Безразмерная величина
47	$\bar{H}_{i,j}$	HHB(I, J)	Безразмерная величина
48	$\bar{V}_{\xi i,j}$	VKS(I, J)	Горизонтальная составляющая скорости материальной точки
49	$\bar{V}_{\eta i,j}$	VP(I, J)	Вертикальная составляющая скорости материальной точки
50	$\bar{\omega}_{i,j}$	W(I, J)	Напряженность вихря
51	$\bar{\psi}_{i,j}^{-k+1}$	KF1(I, J)	Новое приближение функции тока
52	Pe	PE	Число Пекеля
53	E/Pe	ERRE	Отношение числа Эккерта к числу Рейнольдса
54	$\bar{\mu}'_{i,j}$	K1B	Коэффициент эквивалентной вязкости металла
55	$\bar{\omega}_{i,j}^{P+1}$	W1(I, J)	Новое приближение напряженности вихря
56	$\bar{\dot{\epsilon}}_{\xi}$	SVK(I, J)	Скорость продольной деформации
57	$\bar{\dot{\epsilon}}_{\eta}$	SVT(I, J)	Скорость поперечной деформации

Продолжение таблицы 6.2

№ п/п	Обозначение величины		Расшифровка обозначения
	матем.	в progr.	
58	$\bar{\sigma}_{\xi\eta}$	GM(I, J)	Скорость деформации сдвига
59	$\bar{P}_{i,j}$	PGB(I, J)	Безразмерная величина
60	$P_{i,j}$	PG(I, J)	Гидростатическое давление
61	$\mu_{i,j}$	K2(I, J)	Коэффициент вязкости
62	$\dot{\varepsilon}_{\xi}$	SV1(I, J)	Скорость продольной деформации
63	$\dot{\varepsilon}_{\eta}$	SV2(I, J)	Скорость поперечной деформации
64	$\dot{\gamma}_{\xi\eta}$	SV3(I, J)	Скорость деформации сдвига
65	σ_{ξ}	SK(I, J)	Продольные растягивающие напряжения
66	σ_{η}	ST(I, J)	Поперечные напряжения
67	$\tau_{\xi\eta}$	SKT(I, J)	Касательные напряжения
68	$\xi^{(i)}$	KSS(I)	Координата, задающая нейтральное сечение
69	$\xi^{(i\gamma)}$	KST(I)	Координата, задающая нейтральное сечение
70	ξ_i''	KSP(I)	Координата, задающая нейтральное сечение
71	$\mathcal{L}(\xi_i'')$	YIP(J)	Длина криволинейного поперечного сечения
72	$Q(\xi_i'')$	Q(I)	Удельный расход металла в каждом сечении
73	$h_{сеч}$	HSD(I)	Высота сечения в очаге деформации
74	α_h	UNH(I)	Угол наклона хорды
75	h_c	HTC(I)	Высота полосы в крайних точках зоны прилипания
76	h_d	HTD(I, M)	Высота полосы в крайних точках зоны прилипания
77	h_{nc}	HNS(I)	Высота нейтрального сечения
78	$\sigma_{i\mu}$	STP(I, M)	Сила трения покоя
79	a	A	Нижний и верхний пределы интегрирования по формуле Симпсона
80	b	B	
81	M_l	M1	Число разбиений
82	h_{mc}	HMS(I)	Шаг интегрирования
83	x_{mc}	XMS	Параметр интегрирования
84	f_{mc}	FMS	Подинтегральная функция
85	$H_{i,j}$	ISD(I, J)	Интенсивность скоростей деформации
86	$\Delta\tau_{i,j}$	DET(I, J)	Временной шаг интегрирования
87	$\Lambda_{i,j}$	LB(I, J)	Накопленная деформация
88	$\psi_{i,j}$	SIRP(I, J)	Степень использования ресурса пластичности

Ввиду симметрии очага деформации расчет выполняется для $\frac{1}{2}$ его части (рисунок 6.2), что позволяет ускорить расчет, упростить анализ результатов расчета.

Оценку работоспособности компьютерной программы (тестирование) выполнили, моделируя процесс горячей прокатки полосы с исходными данными из таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Исходные данные для тестирования программы

№ п/п	Обозначение параметра	Наименование параметра	Единицы измерения	Значения
1	R	Радиус валка	м	0,5
2	h_0	Начальная толщина раската	м	0,06
3	h_1	Конечная толщина раската	м	0,04054
4	V_v	Скорость валка	м/с	6
5	$t_{цм}$	Температура центрального слоя металла	°С	1050
6	K_p	Коэффициент теплопроводности металла	Вт/м·К	28,5
7	C_p	Теплоемкость металла	кДж/кг·К	0,69
8	ρ	Плотность металла	кг/м ³	7850
9	f	Коэффициент трения покоя	—	0,28
10	K	Сопротивление чистому сдвигу	МПа	10
11	μ	Динамическая вязкость	МПа	0,1
12	t_v	Температура валка	°С	20

Результаты тестового расчета, выполненного для точки в очаге деформации с координатами (2.2) (рисунок 6.3), указаны в таблице 6.4.

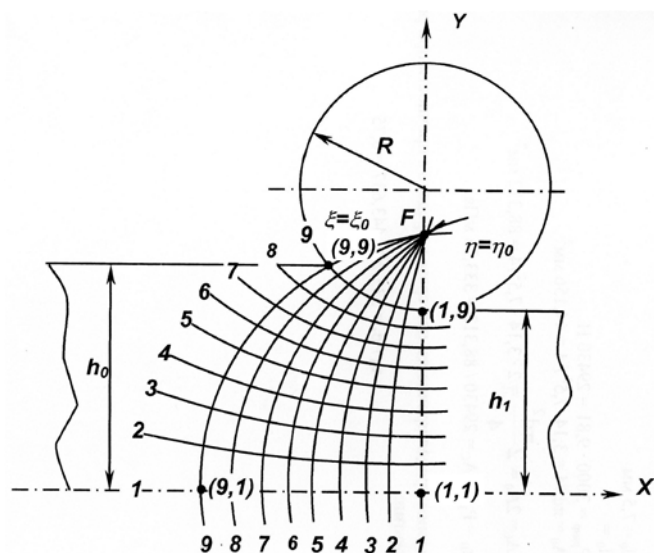


Рисунок 6.3 – Схема очага деформации в биполярной системе координат

Таблица 6.4 – Результаты тестового расчета

№ п/п	Наименование величины	Тестовый расчет
1	Распределение температуры в очаге деформации	1044,111
2	Горизонтальная составляющая скорости материальной точки	-0,01039
3	Вертикальная составляющая скорости материальной точки	-0,0208
4	Напряженность вихря	94,472
5	Коэффициент эквивалентной вязкости металла	1,3989
6	Гидростатическое давление	-173,3538
7	Скорость продольной деформации	0,2968
8	Скорость поперечной деформации	-0,2968
9	Скорость деформации сдвига	-1,6975
10	Продольные напряжения	-173,5284
11	Поперечные напряжения	-173,5488
12	Касательные напряжения	-0,01402
13	Накопленная деформация	1,0275
14	Предельная деформация	6,5768
15	СИРП	0,1562

Сопоставляя данные таблицы 6.4 с данными работы [19] полученными при тех же, что и в таблице 6.4 условиях, и принятыми за эталонные, установили их совпадение с точностью 5-8%. Такая точность является вполне приемлемой и свидетельствующей о пригодности

разработанной компьютерной программы для моделирования процесса горячей прокатки на широкополосном стане.

6.2 Моделирование ресурса пластичности при прокатке на НШПС-1700

Целями моделирования являются: изучение закономерностей изменения степени использования ресурса пластичности, напряженно-деформированного состояния непрерывнолитого металла в процессе горячей прокатки на НШПС-1700; разработка упрощенных инженерных регрессионных моделей, позволяющих эффективно, но с достаточной точностью рассчитать степень использования ресурса пластичности, напряжения, деформации в характерных точках очага деформации.

Проиллюстрируем достижение первой из указанных целей на примере моделирования процесса черновой горячей прокатки на НШПС-1700 полосы с размерами 2x1070 мм из непрерывнолитого сляба с размерами 205x1070мм, сталь 3сп. Режимы обжатию скоростей, температуру слябов, другие исходные условия (таблица 6.5) для математического моделированного процесса принимали в соответствии с действующими технологическими инструкциями НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау».

Таблица 6.5 – Условия прокатки слябов 205x1070 мм в черновых клетях НШПС-1700

№ п/п	Параметр	Клеть					
		Черн. о/л	№1	№2	№3	№4	№5
1	H, мм	205	165	124	92	65	46
2	h, мм	165	124	95	65	46	43
3	ΔH , мм	40	41	32	28	19	12
4	ϵ , %	19,5	24,8	25,8	30,4	29,2	26,0
5	t, °C	1162	1146	1130	1115	1098	1085
6	V, м/с	1	1	1,68	2,12	2,66	3,14
7	R _в , мм	525	500	475	475	475	475

Характерными точками очага деформации, для которых рассчитывали параметры прокатки, являются крайние точки с координатами (1,1), (1,9), (9,1), (9,9), расположенные на входе в очаг деформации и на выходе из него на оси симметрии и на линии контакта с валками (рисунок 6.3).

В процессе моделирования рассчитывали: продольные напряжения σ_z , поперечные напряжения σ_η , касательные напряжения $\tau_{\xi\eta}$, температуру T,

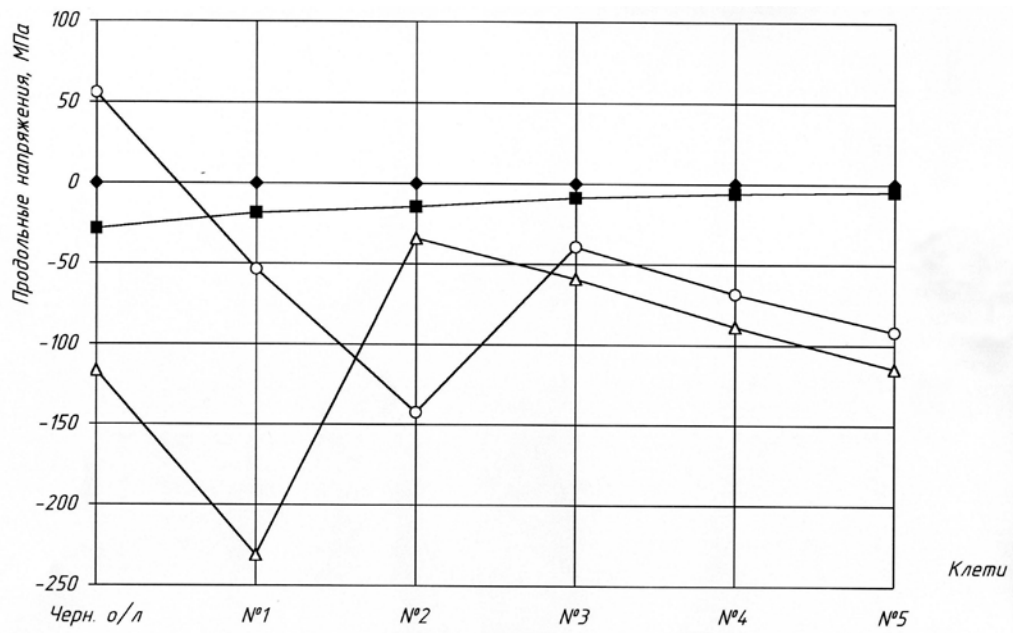
накопленную степень деформации сдвига λ_{Σ} , предельную степень деформации сдвига λ_p , степень использования ресурса пластичности ψ .

Результаты моделирования представляются в таблице 6.6

Таблица 6.6 – Результаты моделирования процесса прокатки сляба 205x1070мм

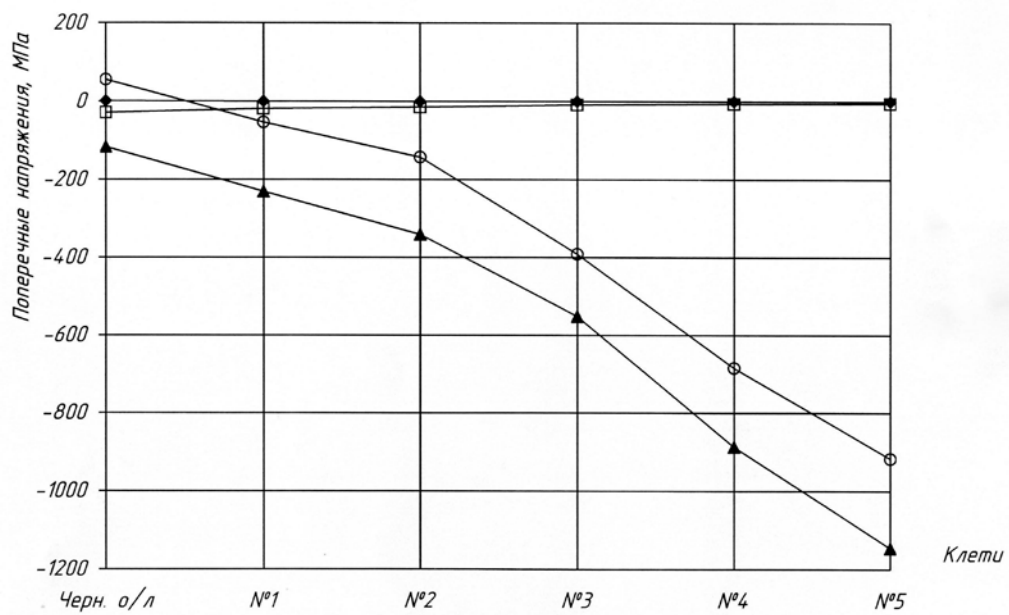
Расчетные параметры	Точка	Клетки					
		Черн. о/л	№1	№2	№3	№4	№5
Температура металла T, °C	(1, 1)	1155	1139	1123	1108	1091	1078
	(1, 9)	1111	1095	1079	1064	1047	1034
	(9, 1)	1162	1139	1123	1108	1091	1078
	(9, 9)	1112	1096	1080	1065	1048	1036
Продольные напряжения σ_{ξ} , МПа	(1, 1)	0,0013	0,0010	0,0016	0,0018	0,0075	0,0073
	(1, 9)	-28,44	-18,31	-14,3	-8,59	-5,78	-4,76
	(9, 1)	-116,6	-231	-34,08	-59,15	-88,71	-114,8
	(9, 9)	55,92	-53,34	-142,6	-39,13	-68,42	-91,73
Поперечные напряжения σ_{η} , МПа	(1, 1)	1,38	0,001	0,0016	0,0018	-0,0075	-0,0073
	(1, 9)	-28,4	-18,3	-14,3	-8,59	-5,7	-4,7
	(9, 1)	-116,5	-231	-340,8	-551,5	-887,1	-1145,8
	(9, 9)	55,9	-53,3	-142,6	-391,3	-684,3	-917,3
Касательные напряжения $\tau_{\xi\eta}$, МПа	(1, 1)	0,0029	0,0022	0,0021	0,0018	-0,0199	-0,0171
	(1, 9)	0,0010	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0013
	(9, 1)	0,221	0,248	-0,0197	0,0157	0,0285	-0,0031
	(9, 9)	0,0212	0,0229	0,0179	0,1968	0,0199	0,0190
Накопленная деформация λ_{Σ}	(1, 1)	0,0025	0,0053	0,0213	0,0624	0,1378	0,2072
	(1, 9)	-0,0046	-0,0087	-0,0448	-0,0115	-0,0046	-0,0031
	(9, 1)	0,2512	0,0160	0,0678	0,0779	0,0492	0,0092
	(9, 9)	-0,0128	-0,0232	-0,0878	-0,0143	-0,0299	-0,0602
СИРП ψ	(1, 1)	0,0002	0,0004	0,0018	0,0061	0,0150	0,0239
	(1, 9)	0,0004	0,0007	0,0045	0,0010	0,0004	0,0004
	(9, 1)	0,0021	0,0013	0,0072	0,0085	0,0052	0,0106
	(9, 9)	0,0012	0,0028	0,0104	0,0014	0,0032	0,0717

По данным таблицы 6.6 построены графики изменения расчетных величин при прокатке на НШПС-1700. Графики показаны на рисунках 6.4-6.9.



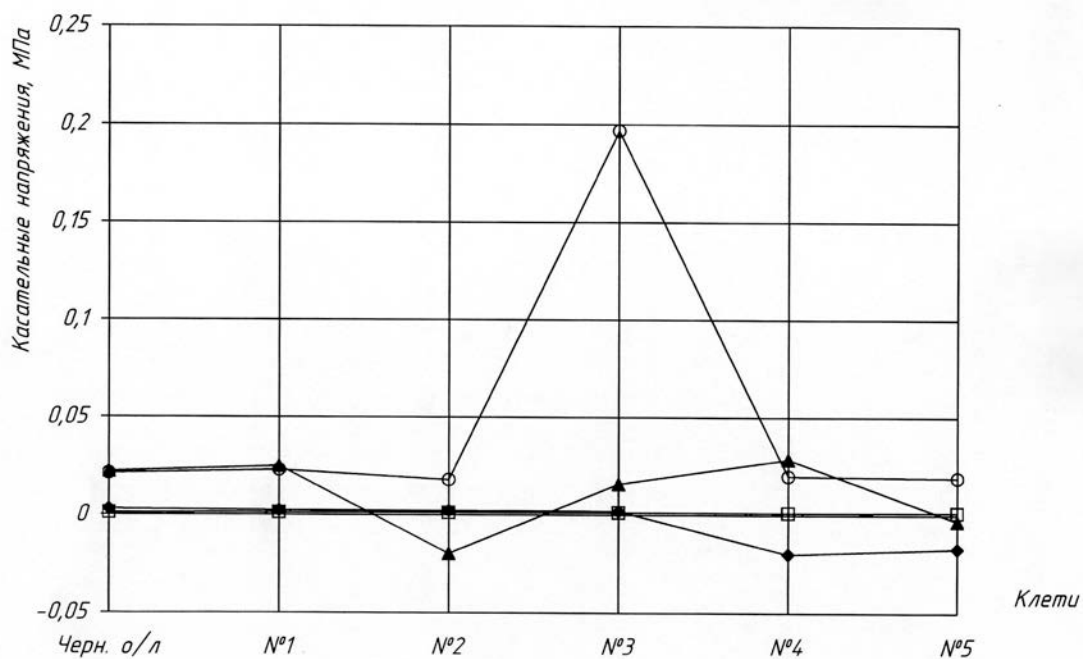
◆ - точка (1, 1); □ - точка (1, 9); ▲ - точка (9, 1); ○ - точка (9, 9);

Рисунок 6.4 – Продольные напряжения в крайних точках очага деформации по клетям черновой группы



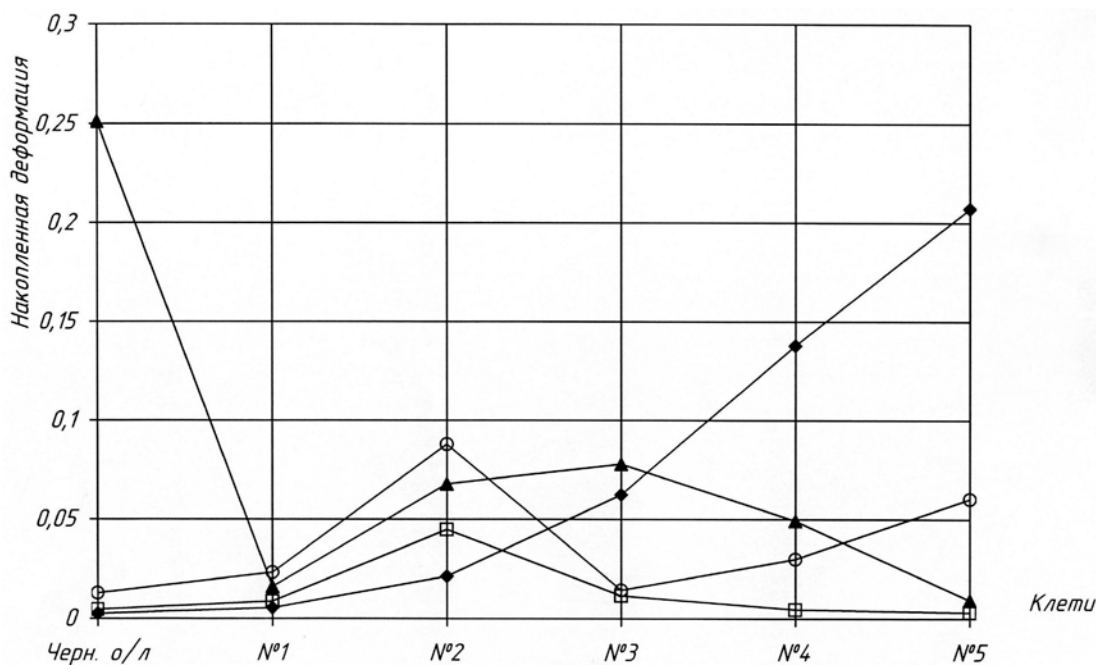
◆ - точка (1, 1); □ - точка (1, 9); ▲ - точка (9, 1); ○ - точка (9, 9);

Рисунок 6.5 – Поперечные напряжения в крайних точках очага деформации по клетям черновой группы



◆ - точка (1, 1); □ - точка (1, 9); ▲ - точка (9, 1); ○ - точка (9, 9);

Рисунок 6.6 – Касательные напряжения в крайних точках очага деформации по клетям черновой группы



◆ - точка (1, 1); □ - точка (1, 9); ▲ - точка (9, 1); ○ - точка (9, 9);

Рисунок 6.7 – Накопленная деформация в крайних точках очага деформации по клетям черновой группы

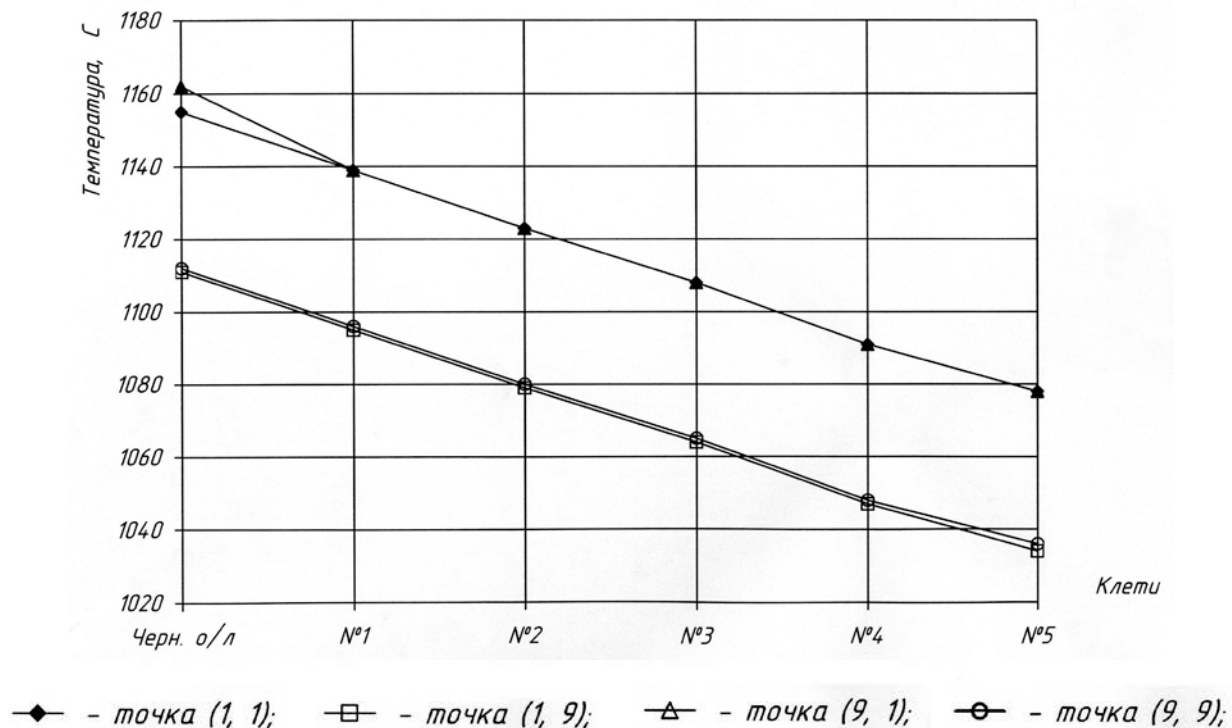


Рисунок 6.8 – Температура в крайних точках очага деформации по клетям черновой группы

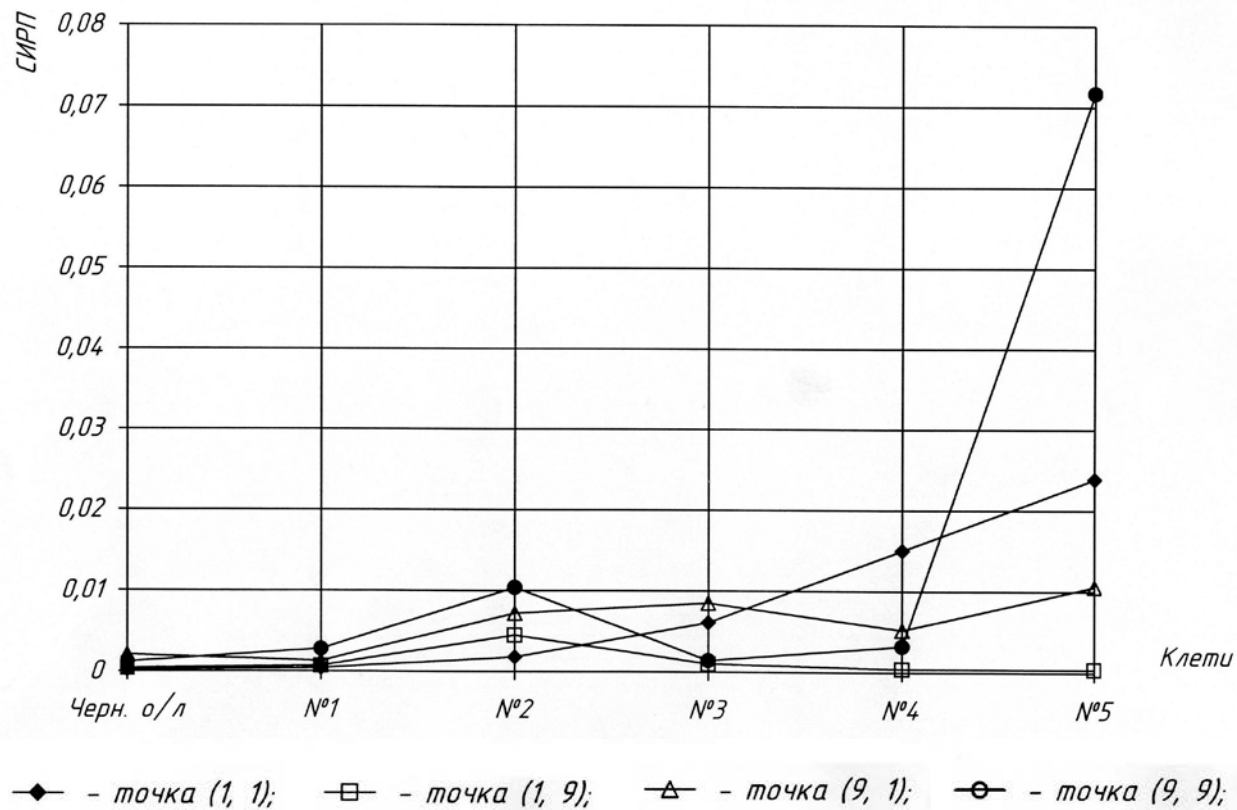


Рисунок 6.9 – СИРП в крайних точках очага деформации по клетям черновой группы

Из рассмотрения графиков на рисунках 6.4-6.9 можно заключить следующее.

Продольное напряжение в точке (1,1), находящиеся на оси симметрии полосы, на выходе из очага деформации всех черновых клетей равно нулю.

Продольное напряжение в точке (1,9), находящейся на линии контакта металла с валком, в выходном сечении очага деформации, является сжимающим, с максимальным значением, равным 28,44 МПа для чернового окалиноломателя и равномерно убывающим до 18,31 МПа в клетке №1, до 14,3 МПа в клетке №2, до 8,59 МПа в клетке №3, до 5,78 МПа в клетке №4 и до 4,76 МПа в клетке №5.

На входе в очаги деформации рабочих клетей действуют продольные сжимающие напряжения, максимальное из которых (237 МПа) наблюдаются в точке (9,1) очага деформации черновой клетки №1.

В этой же точке очага деформации чернового окалиноломателя продольное сжимающее напряжение равно 116 МПа. В клетке №2 сжимающее напряжение в точке (9,1) уменьшается до 34 МПа, затем монотонно возрастает до 114,8 МПа в черновой клетке №5.

В точке (9,9), т.е. на входе в очаг деформации, на линии контакта металла с валком продольное напряжение от растягивающего в 55,9 МПа в черновом окалиноломателе изменяются до сжимающего величиной 53,3 МПа в клетке №1 и до 142,6 МПа в клетке №2.

В клетке №3 напряжение в точке (9,9) уменьшается до 39 МПа и увеличивается до 68,9 МПа и 91,7 МПа в клетке №4 и №5.

Поперечные напряжения в точке (1,1), располагаются на оси симметрии полосы, на выходе из очага деформации всех черновых клетей равны нулю. Практически равны нулю поперечные напряжения в точке (1,9), находящиеся на линии контакта металла с валком в выходном сечении очага деформации всех черновых клетей.

Поперечное напряжение в точке (9,1), расположенной на входе в очаг деформации, на оси симметрии полосы, во всех клетях является сжимающим и достаточно равномерно возрастающим с 116,5 МПа в черновом окалиноломателе до 231 МПа в клетке №1, до 340,8 МПа в клетке №2, до 551,5 МПа в клетке №3, до 887,1 МПа в клетке №4, до 1145,8 МПа в клетке №5.

Поперечное напряжение в точке (9,9) на входе в очаг деформации на линии контакта металла с валком является растягивающим, равным 55,9 МПа для чернового окалиноломателя.

Во всех остальных клетях поперечное напряжение в рассматриваемой точке (9,9) становится сжимающим и увеличивающимся от 53,3 МПа в клетке №1 до 142,6 МПа в клетке №2, до 391,3 МПа в клетке №3, до 684,3 МПа в клетке №4 и до 917,3 МПа в клетке №5.

Касательные напряжения во всех исследуемых точках очага деформации и всех рабочих черновых клетях колеблются с небольшим размахом относительно нулевого уровня. Исключение составляет клетка №3,

со скачкообразным увеличением касательного напряжения до 0,22 МПа в точке (9,9), находящейся на входном сечении очага деформации на линии контакта металла с валком.

Основной особенностью распределения по черновым клетям накопленной деформации сдвига является её наибольшее значение (0,25) в точке (9,1), на входе в очаг деформации чернового окалиноломателя, на оси симметрии полосы и 0,21 в точке (1,1), на оси симметрии полосы на выходе из очага деформации клеток №4 и №5.

В точке (1,1), находящейся на оси симметрии полосы, в выходном сечении очага деформации накопленная деформация сдвига увеличивается от клетки к клетке, с 0,0025 (черновой окалиноломатель) до 0,0053 (клетка №1), до 0,0213 (клетка №2), до 0,0624 (клетка №3), до 0,1318 (клетка №4), до 0,2072 (клетка №5).

Изменение температуры металла в точках его контакта с валком очага симметрии полосы подчинено общей и хорошо согласующейся с другими исследованиями закономерности – падению температуры практически линейно от чернового окалиноломателя до черновой клетки №5: от 1155-1162⁰С до 1078⁰С в точках (1,1) и (9,1), расположенных на оси симметрии полосы; от 1111-1112⁰С до 1034-1036⁰С в точках (1,9) и (9,1), расположенных на линии контакта металла с валками.

При этом линия тренда температуры осевых точек расположена на 44-50⁰С выше линии тренда температуры контактных точек, что свидетельствует о существенном и сохраняющемся в процессе всей черновой прокатки градиенте температур по высоте прокатываемой полосы.

Это может отрицательно сказаться на напряженно деформированном состоянии металла в очаге деформации, его пластичности.

Степень использования ресурса пластичности металла увеличивается по ходу прокатки, достигая наибольшего значения в клетке №5, в точке (9,9), т.е. на линии контакта металла с валком, на входе в очаг деформации. В наименьшей мере пластичность металла к концу черновой прокатки использована в точке (1,9), находящейся на линии контакта металла с валком, в выходном сечении очага деформации.

Учитывая небольшие значения степени использования ресурса пластичности в исследуемых точках очага деформации черновых клеток, можно заметить, что среди них нет таких, в которых значение степени использования ресурса пластичности приобретает критическое, угрожающее для целостности прокатываемого металла значение. И это свидетельствует о рациональности назначенных и используемых на НШПС-1700 режимов черновой прокатки слэбов выбранных размеров с точки зрения опасности нарушения сплошности металла, возникновения соответствующих поверхностных или внутренних дефектов.

6.3 Расчет полиномиальных моделей

Разработанный алгоритм и составленная по нему компьютерная программа позволяют моделировать очаг деформации при горячей прокатке в условиях широкополосных станов, с определением кинематических параметров, показателей напряженно-деформированного состояния, степени использования ресурса пластичности и других показателей в любой точке очага деформации.

Однако практическое применение программы, например, в производственных условиях может быть несколько затруднено из-за ее достаточной сложности и большого количества итоговой информации, выводимой в форме таблиц, графиков, линий равного уровня.

Для практического использования в производственных условиях желательно иметь математические модели возможно более простой структуры и в то же время позволяющие предсказывать значения параметров очага деформации с необходимой точностью.

Этим требованиям в достаточной мере отвечают полиномы различной степени. Идентификация таких полиномиальных моделей осуществляется методами математической статистики [8, 26].

Воспользуемся таким подходом, разработаем полиномиальные модели для расчета показателей напряженно-деформированного состояния металла, степени использования его ресурса пластичности. Применим численный планируемый эксперимент. Для определения значений выбранных функций отклика в точках плана эксперимента воспользуемся разработанной и апробированной ранее компьютерной программой.

За независимые переменные приняли:

$x_1 = l/h_{cp}$ – отношение длины проекции дуги контакта l к средней высоте h_{cp} полосы в очаге деформации (фактор формы очага деформации);

$x_2 = f$ – коэффициент контактного трения;

$x_3 = t_c$ – температура центрального слоя полосы, °С.

По данным предварительных расчетов и экспериментов опасными с точки зрения нарушения сплошности являются поверхностные слои металла, особенно на входе в очаг деформации. Поэтому в качестве функций отклика использовали:

$y_1 = \psi$ – степень использования ресурса пластичности в точке очага деформации с координатами (9,9);

$y_2 =$ продольное напряжение, в точке очага деформации с координатами (9,9).

Ориентируясь на построение зависимостей вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (6.60)$$

выбрали план полного факторного эксперимента типа 2^3 [22].

Условия планирования эксперимента (таблица 6.7) определим на основе режимов работы НШПС-1700.

Таблица 6.7 – Условия планирования эксперимента

Параметр	Факторы		
	x_1	x_2	x_3
Основной уровень	$\frac{0}{1,25}$	$\frac{0}{0,29}$	$\frac{0}{1060}$
Интервал варьирования	$\frac{1}{0,75}$	$\frac{1}{0,01}$	$\frac{1}{10}$
Нижний уровень	$\frac{-1}{0,5}$	$\frac{-1}{0,28}$	$\frac{-1}{1050}$
Верхний уровень	$\frac{+1}{2,0}$	$\frac{+1}{0,30}$	$\frac{+1}{1070}$

Примечание: в числителе – значения факторов в кодированном виде, в знаменателе – в натуральном.

Матрица планирования эксперимента и полученные в результате численного эксперимента значения функций отклика приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Матрица плана ПФЭ 2^3 и результаты численного эксперимента

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2 , МПа
1	+	$\frac{+}{2,0}$	$\frac{-}{0,28}$	$\frac{+}{1070}$	0,1175	-290
2	+	$\frac{-}{0,5}$	$\frac{-}{0,28}$	$\frac{+}{1070}$	0,0973	-589
3	+	$\frac{+}{2,0}$	$\frac{+}{0,30}$	$\frac{+}{1070}$	0,0317	-146
4	+	$\frac{-}{0,5}$	$\frac{+}{0,30}$	$\frac{+}{1070}$	0,1275	-713
5	+	$\frac{+}{2,0}$	$\frac{-}{0,28}$	$\frac{-}{1050}$	0,0315	-139
6	+	$\frac{-}{0,5}$	$\frac{-}{0,28}$	$\frac{-}{1050}$	0,1212	-716
7	+	$\frac{+}{2,0}$	$\frac{+}{0,30}$	$\frac{-}{1050}$	0,0305	-130
8	+	$\frac{-}{0,5}$	$\frac{+}{0,30}$	$\frac{-}{1050}$	0,0971	-725

Примечание: в числителе – значения факторов в кодированном виде, в знаменателе – в натуральном.

После расчета коэффициента получили следующие уравнения в кодированных переменных:

$$y_1 = 0,0817 - 0,0289x_1 - 0,01x_2 + 0,0117x_3; \quad (6.61)$$

$$y_1 = -431,17 + 255,5x_1 + 2,69x_2 + 3,58x_3. \quad (6.62)$$

Выполнен статистический анализ уравнений. При уровне значимости 95% по критерию Стьюдента подтверждена статистическая значимость всех коэффициентов регрессии, а по критерию Фишера – адекватность уравнений.

Уравнение (6.61) показывает, что на y_1 (степень использования ресурса пластичности) в ослабевающем порядке оказывают влияние факторы: $x_1 = l/h_{cp}$ – фактор формы очага деформации; $x_3 = t_u$ – температура центрального слоя полосы; $x_2 = f$ – коэффициент контактного трения. При этом для уменьшения степени использования ресурса пластичности и тем самым уменьшения опасности появления дефектов сплошности необходимо увеличивать факторы $x_1 = l/h_{cp}$ и $x_2 = f$ и уменьшать фактор $x_3 = t_u$.

Из уравнения (6.62) следует, что на y_2 (продольное напряжение) в ослабевающем порядке оказывают влияние факторы: $x_1 = l/h_{cp}$ – фактор формы очага деформации; $x_3 = t_u$ – температура центрального слоя полосы; $x_2 = f$ – коэффициент контактного трения. При этом для увеличения продольного напряжения следует увеличивать факторы $x_1 = l/h_{cp}$ и $x_2 = f$ и уменьшать $x_3 = t_u$.

После перехода от кодированных к натуральным переменным уравнения (6.61) и (6.62) преобразовали к виду:

$$y_1 = 0,08521 - 0,0385 \frac{l}{h_{cp}} - 1,0f + 0,0012t_u; \quad (6.63)$$

$$y_2 = -555,53 + 340,66 \frac{l}{h_{cp}} + 269f - 0,358t_u. \quad (6.64)$$

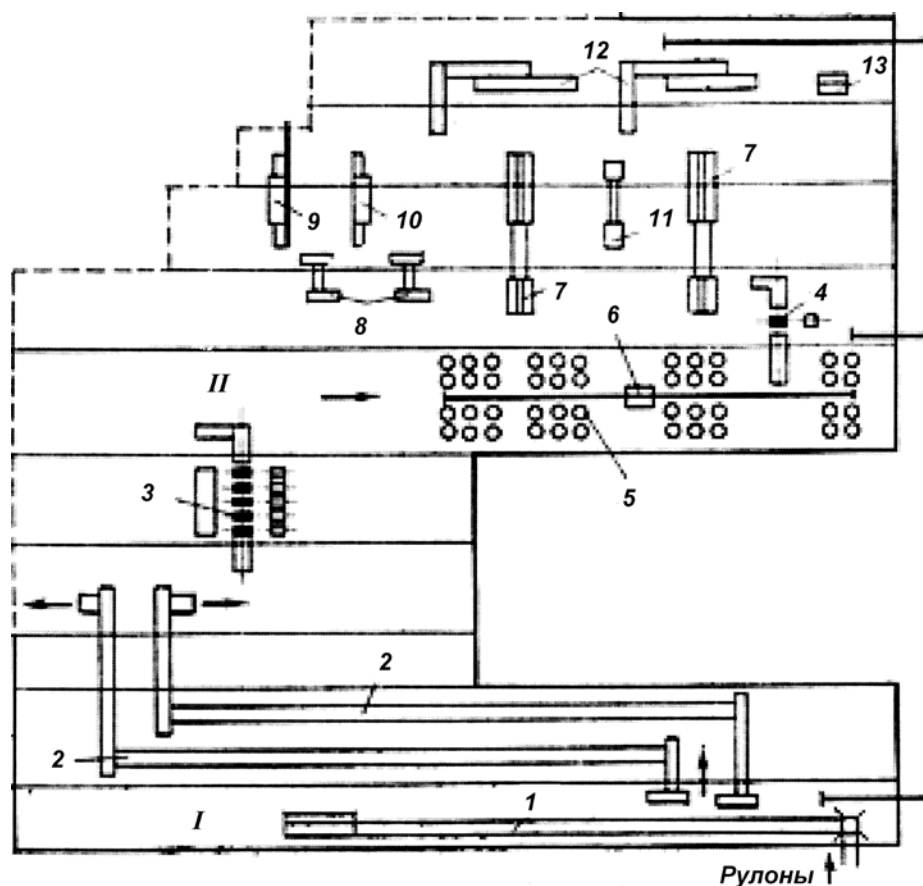
Таким образом, в результате реализации на ЭВМ численного планируемого эксперимента типа ПФЭ 2^3 получили адекватные линейные уравнения регрессии, описывающие напряженное и деформированное состояние металла в наиболее опасной точке очага деформации, на линии контакта металла с валком, на входе в очаг деформации.

Аналогичным образом могут быть получены регрессионные модели для любого показателя и любой точки очага деформации в пределах сеточной области, охватываемой координатными линиями биполярной системы координат.

7 Анализ механических свойств холоднокатаного металла, производимого на стане 1700

7.1 Стан 1700 холодной прокатки листа

Стан 1700 холодной прокатки входит в состав листопрокатного цеха №2 (ЛПЦ-2) АО «АрселорМиттал Темиртау», который введён в эксплуатацию в 1973 году. Цех производит холоднокатаный лист толщиной 0,5-2,0 мм, шириной 900-1400 мм, холоднокатаную ленту толщиной 0,5-2,0 мм, шириной 20-500 мм. Проектная мощность цеха 1,3 миллиона тонн в год. Схема ЛПЦ-2 приведена на рисунке 7.1.



I – склад горячекатаных рулонов; II – склад холоднокатаных рулонов; 1 – транспортер горячекатаных рулонов; 2 – транспортер горячекатаных рулонов; 3 – непрерывный пятиклетьевого стан 1700; 4 – дроссировочный стан 1700; 5 – колпаковые печи; 6 – передаточные тележки; 7 – агрегаты поперечной резки; 8 – агрегаты продольной резки; 9 – агрегат упаковки рулонов; 10 – агрегат упаковки узких рулонов; 11 – агрегаты резки некондиционных листов; 12 – агрегаты упаковки пачек листов; 13 – ножницы.

Рисунок 7.1 – Схема ЛПЦ-2

В составе цеха имеется четыре отделения: травильное, прокатное, термическое и отделение листоотделки.

Горячекатаные рулоны, поступающие в цех, обрабатываются в двух непрерывных травильных агрегатах (НТА-1 и НТА-2) для удаления с поверхности полос окалины в растворе соляной кислоты с регенерацией обработанного травильного раствора. Регенерация осуществляется на установках фирмы «РУТНЕР» (Австрия). Продуктом регенерации является окись железа, которая служит ценным сырьем для отраслей электронной промышленности. Вес травленых рулонов до 45 т. Линии оборудованы стыкосварными машинами.

Прокатное отделение включает непрерывный пятиклетевой стан 1700, производительностью 1300 тыс. т/г, одноклетевой стан 1200 реверсивной прокатки и дрессировочный стан 1700. Конструкция непрерывного пятиклетевого стана и дрессировочного стана унифицирована по рабочим клетям.

Все узлы и механизмы каждой рабочей клетки «кварто» смонтированы на станинах закрытого типа. Каждая клетка имеет рабочие и опорные валки; механизмы уравнивания опорных и рабочих валков; нажимные устройства; механизмы противоизгиба рабочих валков на первой и пятой клетки пятиклетевого стана 1700; главный привод; механизмы перевалки рабочих и опорных валков.

Длина бочки валков 1700 мм, диаметр рабочих валков 700 мм, опорных – 1400 мм. Подшипники рабочих валков роликовые, конические, четырехрядные. Подшипники опорных валков жидкостного трения ПЖТ-1120 с опорным узлом качения. Привод обоих рабочих валков каждой клетки - отдельный.

В состав станом входят разматыватели и моталки.

Стан оборудован локальными автоматическими системами регулирования толщины прокатываемых полос, системой автоматического поддержания межклетевых натяжений в процессе прокатки. На стане широко применены различные гидравлические устройства.

Термическое отделение цеха осуществляет светлый отжиг холоднокатаных рулонов в одностопных колпаковых печах (166 стенов и 66 колпаков). Вес стопы отжигаемых рулонов до 180 т.

Отделение отдели листа включает два агрегата поперечной и два продольной резки рулонов, многодисковые ножницы, агрегаты установки рулонов и пачки листа.

7.2 Технология производства холоднокатаного листа на стане 1700

Стан 1700 перерабатывает подкат, поставляемый ЛПЦ-1, в рулонах весом от 12 до 23 т. Перед травлением на агрегате подготовки обрезаются передний утолщенный конец горячекатаных полос. Для обеспечения

непрерывности травления в НТА установлена стыкосварочная машина. Непрерывная полоса подвергается травлению в растворе соляной кислоты, с первичной концентрацией 2,5–15 %.

Травильная ванна разделена на 5 секций, длиной по 25 метров каждая. В средней технологической части производится травление полосы с целью полного удаления окалины с ее поверхности при температуре раствора 95 °С. Расположение секций ванны каскадное, с переливом кислотного раствора на встречу движения полосы. Поддержание однородности раствора осуществляется перемещением раствора паром, подаваемым в каждую секцию ванны.

В процессе травления, в травильном растворе образуется хлористое железо. Обработанный раствор отводится на регенерацию, а очищенный от хлористого железа раствор доводится до нужной концентрации.

После травления полоса промывается от кислотного раствора, сначала холодной водой под давлением 980 кПа, а затем горячей водой и сушится воздухом при температуре 60-80 °С. В хвостовой части обрезаются боковые кромки, промасливается поверхность, режутся и сматываются полосы в рулоны нужного развеса. В уборочной части НТА рулоны снимаются с моталок, взвешиваются, а затем обвязываются и передаются на транспортер-накопитель склада травленных рулонов.

При прохождении через травильный агрегат производится обрезка боковых кромок и укрупнение веса рулонов до 45 тонн. Размеры и вес рулонов: поступающих – наружный диаметр 1550–2200 мм; внутренний диаметр 850 мм; вес до 23 тонн. Выдаваемых – наружный диаметр 1550–2700 мм; внутренний диаметр – 750 мм; вес до 45 тонн. Размеры полосы: толщина: 1,8–6,0 мм; ширина: 700–1550 мм.

Одна часть травленных рулонов передается на шестиклетьевой прокатный стан цеха жести (ЛПЦ-3) другая – на пятиклетевой стан холодной прокатки 1700 ЛПЦ-2.

Травленные рулоны прокатываются на непрерывном пятиклетевом стане.

После выхода переднего конца полосы из валков первой клетки он на заправочной скорости последовательно задается по проводкам в валки клеток № 2- №5.

Вышедший из последней клетки конец полосы заправляется на барабан моталки, стан выводится на рабочую скорость.

В конце прокатки, когда на головках разматывателя остается два – три витка, стан автоматически переходит на заправочную скорость.

Во время прокатки производится подготовка к задаче в стан следующего рулона.

Задание натяжения полосы на моталке при смотке полос после холодной прокатки производится в автоматическом режиме. Замедление стана перед прокаткой шва осуществляется также в автоматическом режиме.

Прокатка производится за пять пропусков, при скорости выхода полосы из клетки №5 до 25 м/сек.

В качестве технологической смазки применяется эмульсия. Для прокатки полос толщиной 0,4–0,8 мм в качестве смазки используется пальмовое масло.

После последнего пропуска, перед сматыванием производится очистка поверхности полосы от сгоревшей смазки и грязи путем подачи на полосу специального очистного раствора.

Полоса, свернутая в рулон, сталкивается на сниматель рулонов и укладывается на транспортер уборочного устройства, взвешивается и обвязывается на специальных механизмах. После обвязки рулоны подаются для последующего отжига в колпаковых печах.

Режимы обжати применяемые на стане для производства некоторых профилей приведен в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Режимы обжати при прокатке некоторых профилей на пятиклетевом стане 1700

Толщина, мм		Ширина на полосы, мм	Клеть № 1	Клеть № 2	Клеть №3	Клеть № 4	Клеть № 5	Суммарное обжатие, %
Конечная	Подката		Относительное обжатие, %	Относительное обжатие, %	Относительное обжатие, %	Относительное обжатие, %	Относительное обжатие, %	
1	2	3	4	6	7	8	10	11
0,4	2,0	700-1100	32,23	34	31	28	10	80
0,5	2,5	700-1270	33,40	36	32	25	8	80
0,6	2,5	700-1270	31,38	32	28	24	6	76
0,7	2,5	700-1270	28,28	29	25	22	6	72
	2,8	700-1270	29,06	30	28	24	8	75
0,8	2,8	700-1270	27,20	28	25	21	8	71,4
	3,0	700-1270	27,70	29	26	22	10	73,3

Продолжение таблицы 7.1

1	2	3	4	6	7	8	10	11
0,9	3,0	700-1270	26,12	28	25	20	6	70
	3,2	700-1100	27,37	28	26	21	8	71,9
1,0	2,8	700-1450	23,66	25	21	16	6	64,3
	3,0	700-1450	23,54	25	22	9	8	66,7
	3,2	700-1270	24,50	26	24	20	8	68,8
	3,5	700-1100	26,51	28	25	20	10	71,4
1,1	3,0	700-1450	22,66	24	21	16	6	63,3
	3,2	700-1450	23,13	24	22	18	8	65,6
	3,5	700-1270	24,28	26	24	18	10	68,6
1,2	3,2	700-1450	21,93	23	21	16	6	62,5
	3,5	700-1450	23,33	24	22	18	8	65,7

После прокатки рулоны поступают в термическое отделение для "светлого" рекристаллизационного отжига в колпаковых печах. Часть прокатанных рулонов передается в ЦГЦА (ЛПЦ №4) без отжига.

Температура отжига 680–720 °С, конечная температура светлого охлаждения под муфелем 120 °С – для качественного и 140–160 °С – для рядового металла.

Отжиг производится в атмосфере защитного газа (96% азота и 4% водорода). Общее время отжига по проекту 105–150 часов. Время нагрева 10–22 часа, выдержки 24–36 часов, охлаждения под муфелем 60–85 часов.

После распаковки рулоны устанавливаются на участке принудительного охлаждения, где в течение 40–70 часов охлаждаются.

Цикл отжига с охлаждением составляет 145–220 часов. Тепловой режим печей автоматизирован. Рулоны устанавливаются на стендах в стопы высотой до 4,8 м весом до 180 тонн.

Для получения требуемых свойств и плоскостности листа осуществляется прокатка на дрессировочном стане с обжатиями 0,8–5% при скорости до 25 м/с.

Затем рулоны, предназначенные для порезки на листы передаются в листоотделку, где подвергаются порезке на листы и ленту на агрегатах поперечной резки – АПР №2 (0,4–1,2x1550 мм) и АПР №1 (0,6–2,0x1550 мм),

где полоса правится, обрезаются боковые кромки, разрезается на листы заданной длины, которые промасливаются и укладываются в пакеты.

После упаковки на агрегатах упаковки, пачки листов и рулонов отгружаются потребителям.

7.3 Анализ механических свойств холоднокатаного листа

Отбор проб, подготовку образцов, определение механических свойств холоднокатаного листа, произведенного на непрерывном пятиклетевом стане 1700, осуществляли по стандартизированным методикам, описанным ранее. В качестве исследуемых величин использовали пределы текучести σ_T и прочности σ_B , относительное удлинение δ холоднокатаного листа толщиной 0,3 мм, 0,4 мм и 0,5 мм, произведенного из непрерывнолитой стали 08Ю. В таблице 7.2 приведена выборка измеренных механических свойств холодного полосового проката.

Таблица 7.2 – Выборка механических свойств холодного листа

Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %
1	2	3
Толщина листа 0,3 мм		
395	430	30
395	425	30
440	470	30
395	445	29
370	445	30
420	440	32
425	460	27
410	435	27
395	425	29
415	435	32
Толщина листа 0,4 мм		
400	435	31
345	420	31
355	435	32
380	410	30
380	415	30
340	415	32
390	410	30
380	410	33
335	410	31
385	420	31
345	405	33

Продолжение таблицы 7.2

1	2	3
360	435	29
405	430	33
Толщина листа 0,5 мм		
320	420	29
320	420	29
330	425	29
330	440	30
340	440	30
340	430	31
340	430	31
340	435	31
340	420	31
340	430	31
340	430	31
340	430	31
345	405	32
345	430	32
345	400	32
345	410	32
350	420	32
350	415	32
360	425	33
360	430	33
360	415	33
360	435	33
370	415	33
370	410	33
375	450	33
385	420	33
390	435	34
395	440	34

Выборочные данные по всем толщинам проверили на наличие грубых ошибок по критерию Стьюдента. Для этого сравнили расчетные значения критерия τ с табличным $t_{p, N-2}$ [8]:

$$\tau_{(p, N-2)} = \frac{t_{(p, N-2)} \sqrt{N-1}}{\sqrt{N-2 + [t_{(p, N-2)}]^2}} \quad (7.1)$$

Для выделения аномального значения использовали максимальное относительное отклонение:

$$\tau = \frac{|r_i - r_{cp}|}{S} \leq \tau_{(P,N)}. \quad (7.2)$$

Результаты расчетов, используемые для проверки на наличие грубых ошибок приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Данные для проверки на наличие грубых ошибок в выборках

Параметр	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
h= 0,3 мм			
X_{cp}	406	439	29,6
S	19,9	11,25	1,71
τ	1,71	0,977	1,41
$t_{P, N}$	1,85		
h= 0,4 мм			
X_{cp}	369,23	419,23	31,23
S	23,70	10,96	1,30
τ	1,51	1,438	1,36
$t_{P, N}$	1,79		
h= 0,5 мм			
X_{cp}	356,29	424,62	31,74
S	19,59	11,17	1,45
τ	1,70	1,37	1,55
$t_{P, N}$	1,71		

Из таблицы 7.3 следует, что во всех выборках грубых ошибок нет. Далее для каждой выборки рассчитали следующие статистические показатели распределений механических свойств: среднее арифметическое, минимальное значение, максимальное значение, медиану, моду, стандартное отклонение (СКО), дисперсию, эксцесс, асимметричность, (таблицы 7.4-7.6).

Таблица 7.4 – Статистические показатели распределения механических свойств листов толщиной 0,3 мм

Параметр	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
1	2	3	4
Среднее	406,0	441,0	29,6
Минимум	370,0	425,0	27,0
Максимум	440,0	470,0	32,0
Медиана	402,5	437,5	30,0

Продолжение таблицы 7.4

1	2	3	4
Мода	395,0	425,0	30,0
Стандартное отклонение	20,0	14,7	1,7
Дисперсия выборки	398,9	215,6	2,9
Эксцесс	0,119	0,294	- 0,329
Асимметричность	-0,040	0,940	- 0,212
Интервал	70,0	45,0	5,0

Таблица 7.5 – Статистические показатели распределения механических свойств листов толщиной 0,4 мм

Параметр	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ ,%
Среднее	369,2	419,2	31,2
Минимум	335,0	405,0	29,0
Максимум	405,0	435,0	33,0
Медиана	380,0	415,0	31,0
Мода	380,0	410,0	31,0
Стандартное отклонение	23,7	11,0	1,3
Дисперсия выборки	561,9	120,2	1,7
Эксцесс	-1,454	-1,354	-0,954
Асимметричность	-0,042	0,511	0,035
Интервал	70,0	30,0	4,0

Таблица 7.6 – Статистические показатели распределения механических свойств листов толщиной 0,5 мм

Параметр	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ ,%
Среднее	351,3	425,0	31,7
Минимум	320,0	400,0	29,0
Максимум	395,0	450,0	34,0
Медиана	345,0	425,0	32,0
Мода	340,0	430,0	33,0
Стандартное отклонение	19,6	11,8	1,5
Дисперсия выборки	385,8	140,4	2,1
Эксцесс	-0,053	-0,279	-0,565
Асимметричность	0,642	-0,112	-0,478
Интервал	75,0	50,0	5,0

Нормальность выборок проверяли с использованием анализа показателей асимметрии и эксцесса [8]. Несмещенные оценки этих показателей определяли по формулам:

$$G_1 = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} \cdot A_s, \quad (7.3)$$

где A_s – асимметрия выборки;

$$G_2 = \frac{n-1}{(n-2)(n-3)} [(n+1) \cdot E_s + 6], \quad (7.4)$$

где E_s – эксцесс выборки.

Для проверки гипотезы нормальности распределения вычисляем среднеквадратические отклонения для показателей асимметрии и эксцесса:

$$S_{G_1} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}; \quad (7.5)$$

$$S_{G_2} = \sqrt{\frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}}. \quad (7.6)$$

Если выполняются условия:

$$|G_1| \leq 3S_{G_1}; \quad |G_2| \leq 5S_{G_2}, \quad (7.7)$$

то гипотеза нормальности исследуемого распределения принимается. Результаты расчета величин необходимых для проверки гипотезы о нормальности распределения выборочных данных, приведены в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Данные для проверки распределений на нормальность

Параметр	σ_T , МПа	σ_B , Мпа	δ , %
1	2	3	4
$h = 0,3$ мм			
g_1	-0,04	0,88	-0,21
g_2	0,12	0,82	-0,32
G_1	-0,04	0,35	-0,25
G_2	1,17	2,42	0,38
S_{G_1}	0,68	0,68	0,68
S_{G_2}	1,33	1,33	1,33

Продолжение таблицы 7.7

1	2	3	4
h= 0,4 мм			
Параметр	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ ,%
g_1	-0,04	0,51	0,03
g_2	-1,45	-1,35	-0,95
G_1	-0,04	0,57	-1,08
G_2	-1,56	-1,42	3,23
S_{G_1}	0,61	0,61	0,61
S_{G_2}	1,19	1,19	1,19
h= 0,5 мм			
Параметр	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ ,%
g_1	0,64	-0,11	-0,47
g_2	-0,05	-0,27	-0,56
G_1	0,68	-0,11	-0,50
G_2	0,19	-0,07	-0,42
S_{G_1}	0,44	0,44	0,44
S_{G_2}	0,87	0,87	0,87

Из таблицы 7.7 видно, что условие нормальности распределения (7.7) всех элементов выборки выполняется, следовательно, гипотеза нормальности исследуемых распределений может быть принята.

Построили стратификацию данных, учитывая количество измерений для каждой толщины листа. График стратификации представлен на рисунке 7.2. Он показывает что основную долю в исследуемом массиве данных занимает лист толщиной 5 мм.

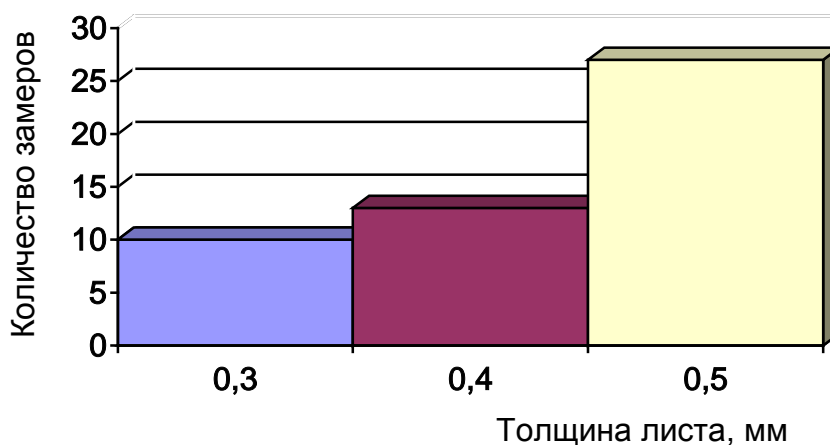


Рисунок 7.2 Стратификация замеров для каждой толщины полосы

На рисунке 7.3 в качестве примера приведена гистограмма эмпирического распределения относительного удлинения листа толщиной 0,5 мм.

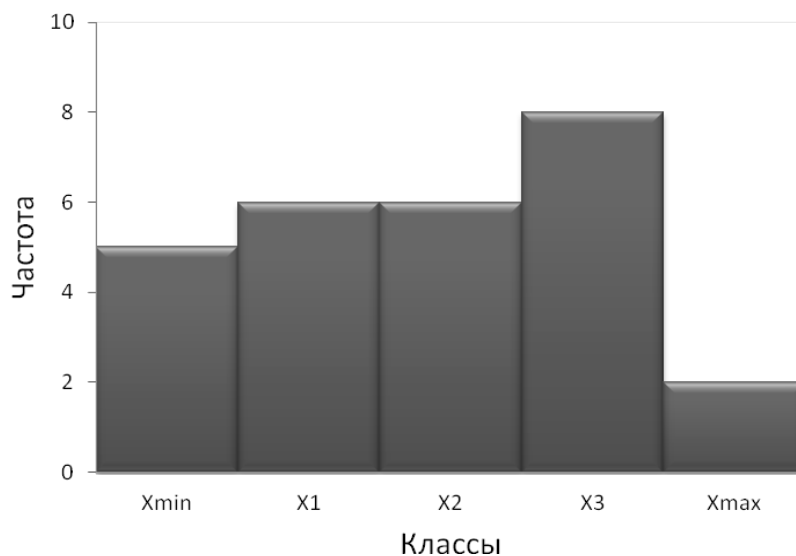


Рисунок 7.3 – Эмпирическое распределение относительного удлинения листа толщиной 0,5 мм

Гистограмма свидетельствует о скошенности распределения. Среднее значение гистограммы локализуется справа от центра размаха.

Весьма наглядно иллюстрируют соответствие показателей свойств установленным требованиям (ГОСТ, ТУ) контрольные карты. Методика их построения изложена в работе [16]. Воспользовавшись этой методикой, построили контрольные карты исследуемых величин и толщин листа. В качестве примера на рисунке 3.4 приведена контрольная карта для относительного удлинения листа толщиной 5 мм.

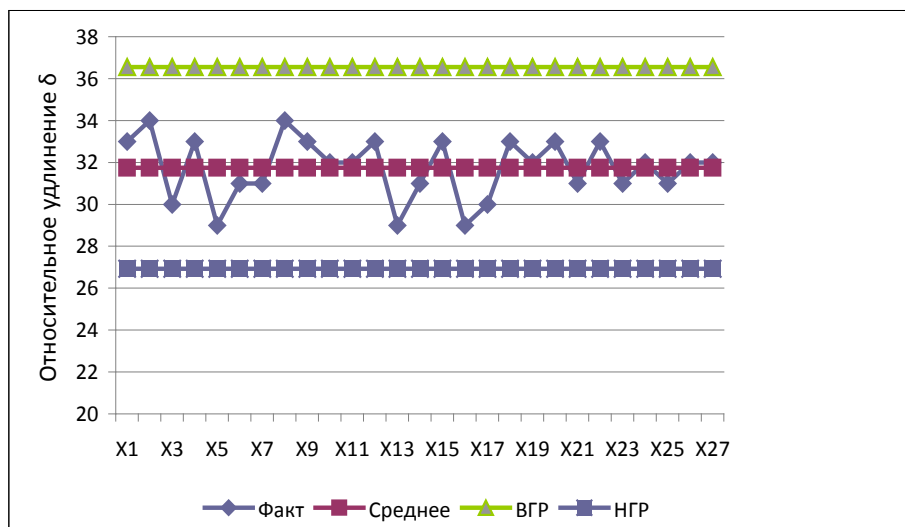


Рисунок 3.4 – Контрольная карта текущих значений относительного удлинения листа толщиной 0,5 мм

Контрольная карта свидетельствует о том, что измеренные значения относительного удлинения не отклоняются за пределы допустимых значений. Аналогичные результаты получены при построении и рассмотрении контрольных карт остальных показателей и толщин листа.

7.4 Квалиметрическая оценка качества холоднокатаного листа

Решалась задача квалиметрической оценки качества холоднокатаного листа, произведенного из непрерывнолитой стали 08ю на пятиклетевом непрерывном стане 1700 АО «АрселорМиттал Темиртау». Для сопоставления использовали данные ранее выполненных в условиях пятиклетевом непрерывном стане 1700 АО «АрселорМиттал Темиртау» исследований свойств холоднокатаного листа, произведенного из слиточной стали 08кп. Размеры холоднокатаных полос 1,1×1265 мм.

Вырезку стандартных образцов для оценки свойств производили из хвостовой части рулонов, по краям и середине. Использовали по 10 рулонов холоднокатаных полос указанных марок стали.

В качестве единичных показателей учитывали механические свойства: пределы прочности σ_B и текучести σ_T , относительное удлинение δ и твердость HRB , глубину лунки, показатели штампуемости R и n .

Результаты измерений механических свойств образовали выборку объемом более 1000 наблюдений. Выборку подвергли статистическому анализу с проверкой на наличие грубых ошибок, соответствие нормальному закону распределения и т.д. В таблицах 7.8 представлены фрагменты этой выборки.

Таблица 7.8 – Результаты механических испытаний холоднокатаных полос

№ рулона	По ширине листа	Механические свойства						
		Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость HRB	Глубина лунки, мм	Показатели штампуемости	
							R	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	край	350/382	254/275	32,1/32,0	50,2/54,9	10,1/10,6	1,19/1,15	0,20/0,19
	середина	357/385	259/275	33,5/32,5	51,3/55,0	11/10,6	1,19/1,31	0,19/0,19
	край	356/385	259/270	33,0/32,5	51,2/54,6	10,4/10,9	1,24/1,39	0,19/0,20
2	край	402/364	315/259	25,0/36,4	56,4/52,6	9,8/11,1	1,15/1,25	0,21/0,21
	середина	405/359	320/261	26,7/35,8	57,0/53,1	9,5/11,5	1,15/1,42	0,21/0,21
	край	403/360	318/257	26,2/36,7	57,0/52,9	9,6/11,4	1,17/1,38	0,20/0,21
...
9	край	350/350	247/200	33,4/34,5	49,0/50,0	10/10,9	1,26/2,00	0,19/0,19
	середина	357/351	242/204	33,7/35,0	48,8/50,8	10,8/11,4	1,20/1,98	0,19/0,20
	край	351/346	250/201	34,0/34,9	49,4/50,1	10,6/11,0	1,24/1,86	0,19/0,21

Продолжение таблицы 7.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	край	402/345	314/210	40,2/33,6	56,5/51,1	11,9/11,6	1,18/1,19	0,19/0,21
	середина	404/345	317/215	39,5/35,1	55,9/51,6	12,0/11,8	1,20/1,30	0,20/0,22
	край	404/341	311/212	39,4/34,7	55,8/51,3	11,7/11,2	1,20/1,25	0,20/0,22

Примечание: числитель – сталь 08кп; знаменатель – сталь 08ю.

С использованием результатов статистической обработки данных о свойствах холоднокатаного листа рассчитали дифференциальные и комплексные показатели качества (таблица 7.9).

Таблица 7.9 – Дифференциальные и комплексные показатели качества холоднокатаного листа

По ширине листа	Значение	Дифференциальные показатели качества k_{ij}							Комплексный показатель качества K_0
		Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость HRB	Глубина лунки, мм	Показатели штампуемости		
							R	n	
край	Среднее	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7260</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7225</u>
		0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7220
	min	<u>0,6343</u>	<u>0,6355</u>	<u>0,6316</u>	<u>0,6570</u>	<u>0,6780</u>	<u>0,6738</u>	<u>0,6564</u>	<u>0,6991</u>
край	max	0,6658	0,6664	0,6448	0,6554	0,6627	0,6767	0,6718	0,7089
		<u>0,7708</u>	<u>0,7682</u>	<u>0,7743</u>	<u>0,7731</u>	<u>0,8339</u>	<u>0,7923</u>	<u>0,7762</u>	<u>0,7491</u>
	0,7787	0,7734	0,7837	0,7827	0,7978	0,7735	0,7922	0,7341	
середина	Среднее	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7221</u>
		0,7230	0,7230	0,7249	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7222
	min	<u>0,6372</u>	<u>0,6445</u>	<u>0,6360</u>	<u>0,6609</u>	<u>0,6678</u>	<u>0,6686</u>	<u>0,6505</u>	<u>0,6961</u>
середина	max	0,6643	0,6662	0,6469	0,6534	0,6483	0,6665	0,6737	0,7055
		<u>0,7672</u>	<u>0,7698</u>	<u>0,7763</u>	<u>0,7761</u>	<u>0,7942</u>	<u>0,7838</u>	<u>0,7735</u>	<u>0,7497</u>
	0,7809	0,7724	0,8210	0,7808	0,7913	0,7845	0,7814	0,7373	
край	Среднее	<u>0,7221</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7201</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7291</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7222</u>
		0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7220
	min	<u>0,6199</u>	<u>0,6399</u>	<u>0,5969</u>	<u>0,6631</u>	<u>0,6743</u>	<u>0,6715</u>	<u>0,6614</u>	<u>0,7021</u>
край	max	0,6717	0,6660	0,6527	0,6458	0,6677	0,6615	0,6615	0,7106
		<u>0,7714</u>	<u>0,7702</u>	<u>0,7688</u>	<u>0,7839</u>	<u>0,8698</u>	<u>0,7895</u>	<u>0,7793</u>	<u>0,7514</u>
	0,7856	0,7704	0,7944	0,7789	0,7996	0,7819	0,7843	0,7346	
общее	Среднее	<u>0,7227</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7220</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7260</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7230</u>	<u>0,7222</u>
		0,7230	0,7230	0,7236	0,7230	0,7230	0,7230	0,7230	0,7220
	min	<u>0,6199</u>	<u>0,6355</u>	<u>0,5969</u>	<u>0,6570</u>	<u>0,6678</u>	<u>0,6686</u>	<u>0,6505</u>	<u>0,6961</u>
общее	max	0,6643	0,6660	0,6448	0,6458	0,6483	0,6615	0,6615	0,7055
		<u>0,7714</u>	<u>0,7702</u>	<u>0,7763</u>	<u>0,7839</u>	<u>0,8698</u>	<u>0,7923</u>	<u>0,7793</u>	<u>0,7514</u>
	0,7856	0,7734	0,8210	0,7827	0,7996	0,7845	0,7922	0,7373	

Примечание: числитель – сталь 08кп; знаменатель – сталь 08ю.

В таблице 7.10 приведены результаты первичной статистической обработки выборок комплексного показателя качества холоднокатаного листа.

Таблица 7.10 – Показатели статистических распределений комплексных показателей качества холоднокатаного листа

Показатель	Холоднокатаный лист	
	Сталь 08кп	Сталь 08ю
Среднее значение	0,7222	0,7221
Стандартная ошибка	0,0034	0,0018
Медиана	0,7212	0,7198
Стандартное отклонение	0,0187	0,0098
Дисперсия	0,0004	9,67E-05
Эксцесс	-1,4417	-1,4623
Асимметричность	0,2223	-0,0228
Максимальное значение	0,7514	0,7373
Минимальное значение	0,6961	0,7055

Из сравнения средних значений комплексного показателя K_{0CP} следует, что различие в качестве холоднокатаного металла, произведенного из непрерывнолитой стали 08ю и слиточной стали 08кп не выявлено. В соответствии с эмпирической шкалой желательности качество холоднокатаного листа соответствует оценке «хорошо».

8 Математическая модель ресурса пластичности холоднокатаного листа

8.1 Особенности холодной прокатки

К особенностям производства холоднокатаной листовой стали относятся сложность технологического процесса, значительное количество производственных переделов, большой удельный расход энергии.

Основным технологическим агрегатом современного цеха холодной прокатки является полностью непрерывный многоклетьевого стан холодной прокатки.

Одними из основных задач, которые приходится решать при проектировании и эксплуатации таких станов, являются расчет энергосиловых параметров прокатки и обеспечения качества листа.

Прокатка тонколистовой стали в холодном состоянии связана с весьма большими удельными и полными давлениями металла на валки, значительно превышающими таковые в процессе горячей прокатки при прочих равных условиях. Это приводит не только к общей упругой деформации валков, но и к их местной контактной упругой деформации – сплющиванию.

При холодной деформации выделяется значительное количество тепла, которое не удается полностью отвести от рабочей поверхности ни теплопроводностью внутрь валка, ни охлаждением валков эмульсией, ни конвекцией. Тепловой режим работы валков на тонколистовых станах холодной прокатки является одним из главных факторов, определяющим весь технологический процесс. До сих пор он служит предметом многочисленных исследований.

Процесс холодной прокатки листовой стали сопровождается изменением механических свойств материала полосы по длине очага деформации от входа к выходу в каждой клетке и это изменение различно по клеткам. Различие механических свойств полосы по длине очага деформации обуславливает изменение характера распределения удельного давления по длине дуги захвата. Усложняет методику расчета режимов прокатки различное натяжение полосы между клетками и по ширине полосы.

Таким образом, в общем случае определение основных технологических параметров процессов холодной прокатки тонких листов является задачей достаточно сложной [26 - 28].

Очаг деформации при холодной прокатке состоит из участков упругого сжатия, пластической деформации и упругого восстановления полосы.

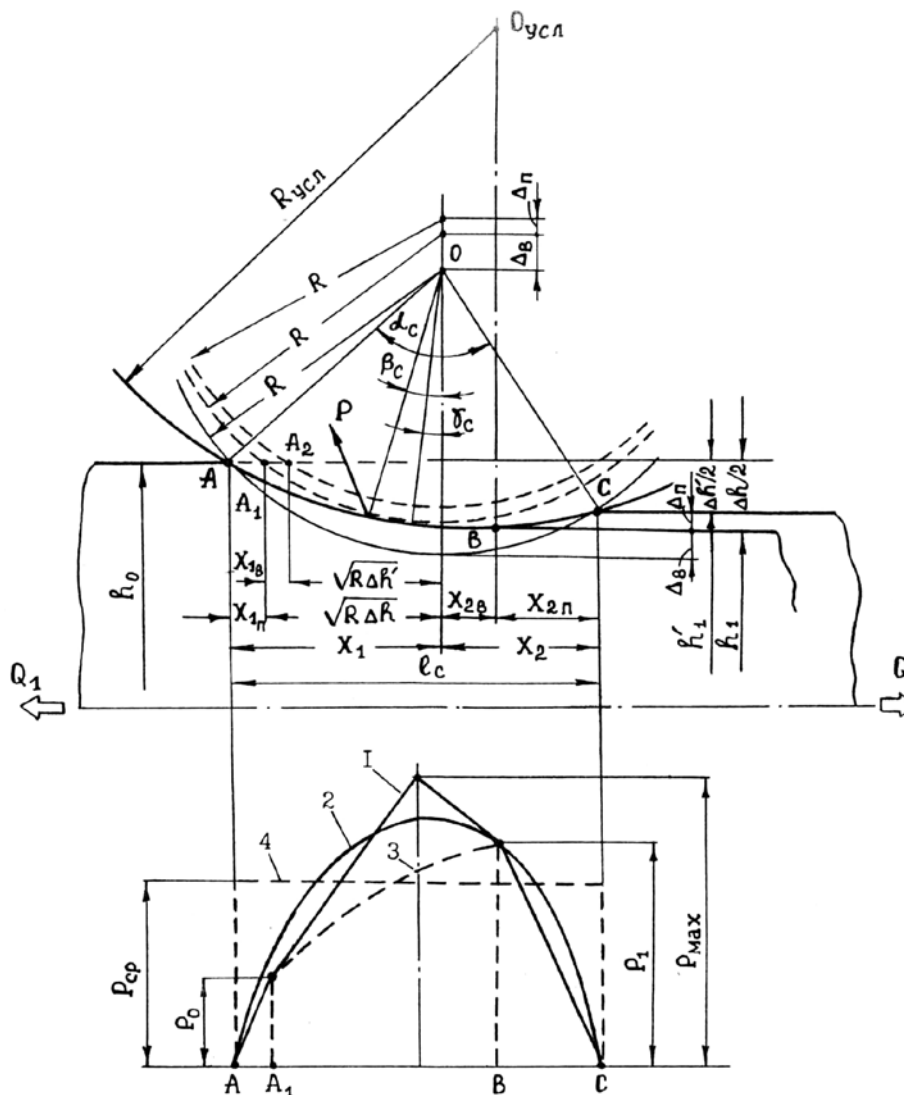
Очаг деформации с учетом упругой деформации валков и полосы показан на рисунке 8.1. Величина упругого сжатия обозначена через Δ_B , упругого восстановления полосы через Δ_{Π} . Чтобы получить необходимое обжатие полосы, следует приблизить каждый валок к полосе на величину

упругой деформации, равной $\Delta_B + \Delta_{II}$. Ось вращения валка в этом случае переместится в точку O , линией контакта металла с валком будет линия ABC .

В результате упругого сплющивания валков, сжатия и восстановления полосы дуга контакта значительно возрастет: по данным А.А. Королева на 30-60%, по данным Е.С. Рокотяна на 100% от теоретически рассчитанной.

Из-за упругого сжатия полосы длина дуги контакта на входе в валки увеличивается на отрезок $X_{1п}$. Упругое восстановление полосы имеет место на участке BC линии контакта, из-за чего длина дуги контакта на выходе из валков увеличивается на отрезок $X_{2п}$. Пластическая деформация полосы заканчивается в точке B . Упругая деформация валков приводит к увеличению длины дуги контакта на входе в валки на отрезок $X_{1в}$ и на отрезок $X_{2в}$ на выходе из валков. Общая протяженность дуги контакта обозначена через ℓ_c , а ее приращение за линией, соединяющей центры вращения валков, через X_2 . Через α_c , β_c , γ_c обозначены соответственно угол упруго-пластического контакта полосы с валком и углы, характеризующие точку приложения равнодействующей давления металла P_c и положения максимума эпюры нормальных напряжений. Угол γ_c характеризует также положение нейтрального сечения. Радиус недеформированного валка и его центр вращения обозначены через R и O , а через $R_{усл}$ и $O_{усл}$ – соответствующие параметры условного валка. Q_1 и Q_2 – величины полного заднего и переднего натяжения, P_0 и P_1 – нормальные напряжения на границах упруго-пластического контакта в зонах отставания и опережения, P_{max} – их максимальное значение, P_{cp} – среднее нормальное напряжение [24].

Важно знать влияние различных факторов на длину дуги захвата при холодной прокатке тонких листов. В.П. Полухин с использованием математической модели процесса прокатки тонких листов изучил влияние различных факторов на составляющие X_1 и X_2 дуги захвата. Было установлено, что при прокатке малоуглеродистых сталей часть дуги захвата X_1 со стороны входа металла в валки (по линии центров валков) практически равна величине $\ell = \sqrt{R\Delta h}$: действительная величине X_1 больше $\sqrt{R\Delta h}$ всего лишь на 2% в диапазоне обычно применяемых на практике обжатий 5-50%. При обжатиях более 80% расхождения могут превысить 15-20%.



I – эпюра нормальных контактных напряжений; 2 – условная эллиптическая эпюра; 3 – кривая упрочнения прокатываемого металла; 4 – контактное давление.

Рисунок 8.1 – Очаг деформации с учетом упругой деформации валков и полосы, эпюры нормальных напряжений

8.2 Алгоритм моделирования ресурса пластичности с учетом дефектов

Весьма часто на непрерывных многоклетевых станах холодной прокатки листа имеют место порывы полос в межклетевых промежутках, приводящие к простоям станов, повреждению прокатных валков, дополнительному расходу металла и другим нежелательным явлениям. Причиной этого является исчерпание металлом ресурса пластичности, усугубляемое наличием на подкате; прокатываемой полосе поверхностных дефектов, служащих концентраторами напряжений. Имея ввиду реальные условия холодной прокатки, т.е. наличие на полосе тех или иных дефектов, оценку пластичности металла, его моделирование при прокатке, следует

выполнять с учетом данного обстоятельства, т.е. дефектов. Современная теория прокатки позволяет это сделать.

Процесс разрушения металла при холодной прокатке зависит от пластических характеристик, степени деформации и напряженного состояния. Всякий металл для данного напряженного состояния при деформировании обладает ресурсом пластичности, определяемым как степень деформации металла до разрушения.

Правильно выбранными режимами прокатки возможно определенное улучшение поверхности металла за счет выкатки дефектов. Улучшение поверхности зависит от условий залегания дефектов, числа их на единицу площади, расположения и др. Изменение глубины залегания зависит от многих технологических факторов и в каждом конкретном случае неодинаково.

Процесс разрушения металла при холодной деформации является сложным, развивающимся во времени процессом, наступление которого зависит от степени деформации и напряженного состояния. То есть всякий металл для данного напряженного состояния при деформировании обладает определенным ресурсом пластичности, определяемым как степень деформации металла до разрушения λ_p . При определении степени использования запаса пластичности принята величина

$$\Psi = \frac{\lambda}{\lambda_p}, \quad (8.1)$$

где λ - текущая деформация;

λ_p - величина деформации до разрушения.

Для монотонных циклических процессов деформации, к которым относится холодная прокатка полосы за несколько проходов, при определении общей степени использования ресурса пластичности принята зависимость:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Psi_i, \quad (8.2)$$

где Ψ_i - величина использования запаса пластичности на i -n этапе,

n - количество этапов деформации.

При определении λ_p принята методика, приведенная в [29]. Преимуществом данной методики является то, что определяющим здесь является один показатель напряженного состояния – отношение октаэдрического напряжения к сопротивлению деформации. В то время как другие методики предлагают зависимость λ_p от двух параметров напряженного состояния, одним из которых является коэффициент Лоде β . В соответствии с выбранной методикой для сталей О8кп, О8пс, О8ю рассчитано уравнение:

$$\lambda_p = \lambda_{p0} e^{1.69 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_{cp}} + \frac{1}{3} \right)}, \quad (8.3)$$

где λ_{p0} - степень деформации до разрушения при одноосном растяжении;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, - главные нормальные напряжения;

σ_{cp} - сопротивление деформации.

Для условий холодной прокатки, с учетом известных допущений:

$$\sigma_{cp} = \sigma_T, \sigma_1 = P_x, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = P_x - 1.15\sigma_T.$$

Уравнение (8.3) можно записать:

$$\lambda_p = \lambda_{p0} e^{1.69 \left(\frac{2P_x - 1.15\sigma_T + 1}{3\sigma_T} \right)}, \quad (8.4)$$

где P_x - нормальное контактное напряжение в очаге деформации;

σ_T - предел текучести металла.

Приняв допущение $P_x = P_{cp}$, $\sigma_T = \sigma_{T,cp}$ с учетом условия $n_\sigma = \frac{P_{cp}}{\sigma_{cp}}$,

получим упрощенное уравнение для расчета величины деформации до разрушения в зависимости от коэффициента напряженного состояния:

$$\lambda_p = \lambda_{p0} e^{0.565(2n_\sigma - 0.15)}. \quad (8.5)$$

Используя уравнения (8.4) и (8.5), можно теоретически рассчитать деформацию разрушения металла при холодной прокатке. Для расчета критической деформации разрушения при прокатке полосы с дефектом необходимо дополнительно принять схему напряженного состояния полосы под поверхностным дефектом.

На поверхности металла с дефектом действуют растягивающие напряжения, которые и приводят к деформации слоев металла непосредственно под дефектом, в то время, как слои металла с противоположной стороны деформируются за счет сжимающих напряжений (P_x).

Таким образом, напряженное состояние по толщине полосы с поверхностным дефектом переменное. Если принять, что сжимающие напряжения применяются от P до 0 , то используя условие пластичности $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_T$ можно допустить следующее распределение напряжений по толщине полосы:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= P_x \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k \\ \sigma_3 &= \sigma_1 - \beta\sigma_T \end{aligned} \right\}, \quad (8.6)$$

где h_i, δ_i - толщина полосы и глубина дефекта на стадии деформации;
 a - расстояние от поверхности полосы без дефекта;
 k - коэффициент, учитывающий влияние внешних зон;
 β - коэффициент Лоде.

Коэффициент k введен в результате наблюдения за ходом разрушения металла при прокатке полосы с дефектом. Как было отмечено дефекты одной исходной глубины, но разной ширины приводят к различной глубине начального поверхностного разрушения. На основании этого выдвинуто предположение о влиянии ширины дефекта на распределение напряжений по толщине полосы. После изменения глубины поверхностного разрушения дефектов разном исходном ширины (рисунок 8.2) приняты следующие значения k

$$\text{для } l_g < 1.5h_0 \quad k = \frac{l_g}{h};$$

$$\text{для } l_g \geq 1.5h_0 \quad k = 1.5.$$

Коэффициент Лоде β также является переменной величиной и изменяется от 1 (непосредственно под дефектом) до 1,15 (с другой стороны полосы). Изменение коэффициента Лоде по толщине полосы по аналогии с зависимостью (8.6) можно описать уравнением:

$$\beta = 1 + 0.15 \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k. \quad (8.7)$$

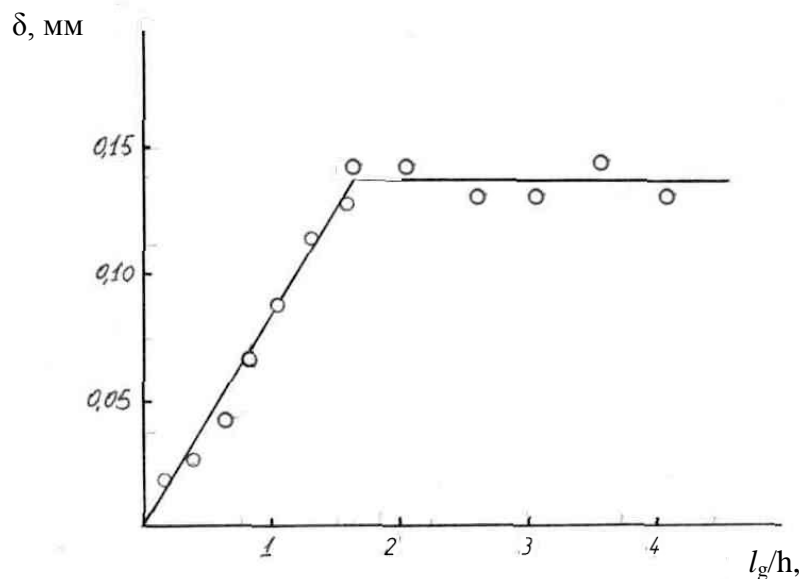


Рисунок 8.2 – Зависимость начальной глубины разрушения (δ) от ширины дефекта (l_g), отнесенных к толщине полосы (h).

Подставив зависимости (8.6) и (8.7) в уравнение (8.3), после преобразований получим уравнение для расчета критической деформации при прокатке полосы с дефектом в любой точке по толщине полосы:

$$\lambda_p^* = \lambda_{p0} e^{0.565 \left[\left(\frac{2P_x}{\sigma_t} - 0.15 \right) \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k \right]} . \quad (8.8)$$

Приняв упрощения $P_x = P_{cp}$, $\sigma_t = \sigma_{т.ср}$, уравнение (4.8) можно записать:

$$\lambda_p^* = \lambda_{p0} e^{0.565 \left[(2n_\sigma - 0.15) \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k \right]} . \quad (8.9)$$

Регламентирование качества подката имеет целью обеспечение бездефектной поверхности холоднокатаной полосы при данных исходных механических свойствах металла, технологии холодной прокатки, суммарного обжатия и включает в себя определение максимального допустимых поверхностных дефектов для данных условий деформации.

Анализ полученных зависимостей для λ_p показывает, что разрушение полосы имеет вероятностный характер. Это связано с тем, что λ_p зависит прежде всего от исходных свойств металла λ_{p0} , которые неоднородны по длине и ширине полосы.

Поэтому для регламентирования качества подката необходимо построение вероятностной гистограммы распределения величины λ_{p0} для данной марки стали. На рисунке 8.3 представлена гистограмма распределения величины λ_{p0} для горячекатаного подката для жести толщиной 2,2-2,5 мм из стали марки 08кп. Как видно из гистограммы величина λ_{p0} изменяется в довольно широком диапазоне. При этом для обеспечения максимальной надежности для расчета необходимо выбрать минимальное значение λ_{p0}^{\min} из полученной гистограммы. Это гарантирует бездефектность холоднокатаной полосы при самых низких пластических свойствах подката.

Первоначально производится расчет параметров напряженного состояния (P_x , σ_t или n_σ) в каждой клетке стана по существующим технологическим режимам. После чего определяется интенсивность выкатывания поверхностных дефектов (J_δ) для данных напряженного состояния и микрогеометрии рабочих валков. Затем по глубине дефекта определяется величина деформации, необходимая для сглаживания дефекта ($\lambda_{вык}$), рассчитывается деформация разрушения для данных условий (λ_p^*) по уравнению (8.8) или (8.9) и находится величина использования ресурса

пластичности на данной стадии трансформации дефекта (Ψ^*). При этом при расчете деформации поверхностного разрушения определяется по напряженному состоянию в точке, соответствующей величине $C = \frac{a}{h_i - \delta_i} = 0.9$, при расчете сквозного разрушения расчет целесообразно

производить для $\frac{a}{h_i - \delta_i} = 0.5$.

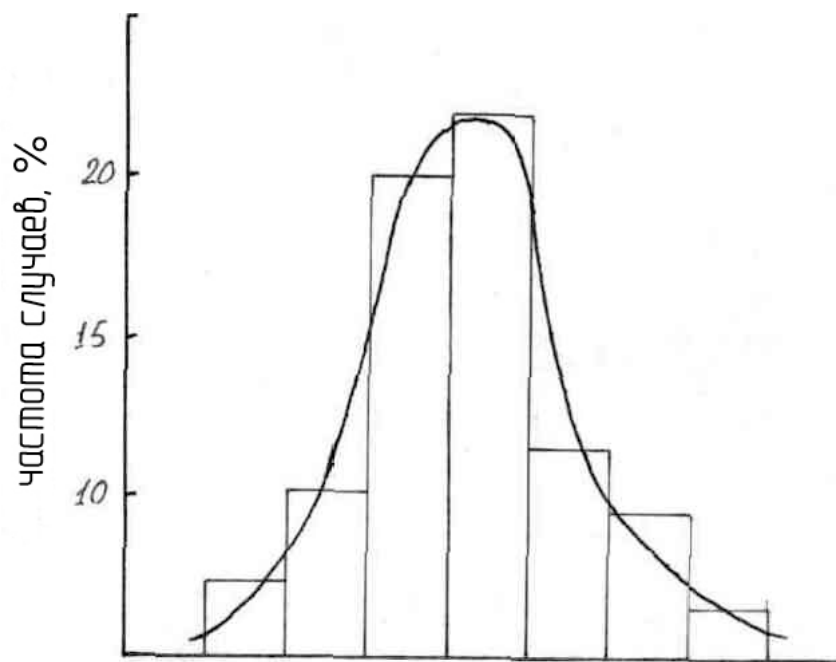


Рисунок 8.3 – Гистограмма и дифференциальная кривая распределения величины λ_{p0} для подката толщиной 2,2-2,5 мм из стали О8кп.

После определения Ψ^* находится величина запаса ресурса пластичности $W = 1 - (\Psi^*)^n$, где коэффициент n зависит от степени изменения напряженного состояния деформации, которое в ряде случаев приводит к частичному "залечиванию" образовавшихся на первой стадии деформации микропор, то есть происходит частичное восстановление ресурса пластичности. Это имеет место, в частности, при смене одноосного растяжения кручением, сжатием или прокаткой. Для учета данного эффекта вводится коэффициент n - который обычно больше единицы. На основании опытных данных рассчитали исходный (при одноосном растяжении Ψ_1) и остаточный (при холодной прокатке Ψ_2) ресурс пластичности, после чего установили коэффициент n , который для случая смены одноосного растяжения холодной прокаткой определен равным 1,46 (рисунок 8.4).

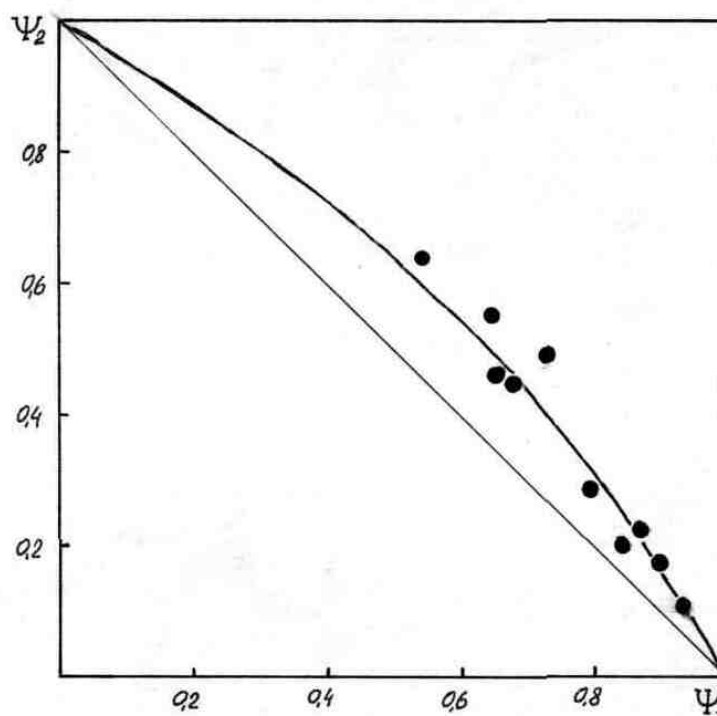


Рисунок 8.4 – Зависимость величины ресурса пластичности при прокатке Ψ_2 от величины использования ресурса пластичности Ψ_1 при предварительном одноосном растяжении

После определения величины запаса ресурса пластичности (при $W > 0$) производится расчет деформации разрушения для данного напряженного состояния (λ_p) по уравнениям (8.4) или (8.5) и находится остаточная деформация металла до разрушения $\lambda_p^{ост} = W\lambda_p$. При соблюдении условия $\alpha(\lambda_{вык} + \lambda_p^{ост}) > \lambda_{\Sigma}$,

где λ_{Σ} - суммарное обжатие полосы при холодной прокатке;

α - коэффициент, определяющий величину допустимого уровня использования ресурса пластичности, данный поверхностный дефект допускается на подкате.

Коэффициент α выбирается из соображений необходимой равномерности механических свойств и особенностей технологии дальнейшей переработки холоднокатаной полосы.

8.3 Блок-схема и программа моделирования ресурса пластичности

Блок-схема алгоритма расчета деформаций разрушения металла при прокатке полосы с поверхностным дефектом изображена на рисунке 8.5.

Расчет по приведенному алгоритму организован в цикле, параметром которого является число проходов (реверсивного стана) или клетей (для станов непрерывной и бесконечной прокатки) и выполняется по ходу

прокатки в последовательности, указанной на схеме стрелками. В прямоугольниках указаны формулы и выражения по которым следует считать, либо присваивать то или иное значение данному выражению в том случае если выполняется, или не выполняется условие написанное в ромбах.

Остановимся на узловых местах блок-схемы. За блоком ввода исходных данных следует блок, в котором находится значение коэффициента k учитывающего влияние внешних зон, в зависимости от исходных значений толщины подката и ширины поверхностного дефекта на нем. После блока определения коэффициента k следует блок, с которого начинается цикл переходов по клетям стана, обусловленный количеством клеток стана или проходов на реверсивном стане. Следующим шагом определяются величина деформации (λ_i) и напряженное состояние металла в данной клетке ($n_{\sigma i}$). В следующем блоке, обозначенном ромбом, определяется наличие на полосе дефекта. Если на полосе дефекта нет (либо он уже выкатан в предыдущих клетях), то расчеты следуют по стрелке «Да» - по правой колонке блок-схемы. При наличии дефекта, то есть $(\delta_i/h_i) > 0$ - следует считать по стрелке «Нет», где первым делом определяется критерий интенсивности сглаживания дефекта ($J_{\delta i}$) в месте дефекта. Следующим шагом является определение и сравнение текущей разницы отношения глубины дефекта $\Delta \frac{\delta_i}{h_i}$ к

предыдущему отношению глубины дефекта с текущей толщиной подката $\frac{\delta_{i-1}}{h_{i-1}}$. В случае если $\Delta \frac{\delta_i}{h_i}$ меньше или равно $\frac{\delta_{i-1}}{h_{i-1}}$, то дефект считается «невыкатанным» и расчеты делаются по стрелке «Нет» с определением отношений $\frac{\delta_i}{h_i}$ и $\frac{\delta_i}{h_i}_{\text{ср}}$. В случае выполнения условия в блоке сравнения,

расчеты выполняются по стрелке «Да», где $\frac{\delta_i}{h_i} = 0$, что говорит о том, что

дефект на полосе выкатан. Также определяется $\frac{\delta_i}{h_i}_{\text{ср}}$. После определения

средних отношений текущей глубины дефекта к текущей толщине дефекта, определяется степень деформации металла до разрушения в месте дефекта (λ_{pi}^*). Также необходимо посчитать степень деформации до разрушения металла без дефекта (λ_{pi}), (находящегося с правой стороны алгоритма). Затем определяется степень использования ресурса пластичности в данном проходе в месте дефекта (Ψ_i^*) и без него (Ψ_i), далее вычисляются суммарные степени использования ресурса пластичности $\Psi_{\Sigma i}^*$, $\Psi_{\Sigma i}$ и суммарная величина деформации раската ($\lambda_{\Sigma i}$). Дальше необходимо сравнить величину использования ресурса пластичности ($\Psi_{\Sigma i}^*$), (в случае, если дефект не выкатан и расчеты ведутся по левой колонке алгоритма) и если она больше

или равна 1, то расчет идет по стрелке «Нет», где подсчитывается деформация разрушения (λ_{pp}^*), то есть данная деформация является окончательной. И если металл продолжать и дальше деформировать в следующих клетях, то это непременно приведет к разрушению металла в клетях. Если $\Psi_{\Sigma i}^* < 1$, то алгоритм возвращает расчеты к блоку сравнения $\frac{\delta_{i-1}}{h_{i-1}}$ при условии, что $i < n$. Если дефект не «выкатан», то блок сравнения отправляет по стрелке «Нет» и все расчеты вновь повторяются, если дефект «выкатан», то расчеты направляются по стрелке «Да». здесь определяется запас использования ресурса пластичности (W). Далее идут расчеты Ψ_i и $\Psi_{\Sigma i}$ без учета дефекта на поверхности раската для данного прохода и суммарная величина деформации раската в этом проходе $\lambda_{\Sigma i}$. Следующим этапом сравниваются значения $\Psi_{\Sigma i} < W$. В случае невыполнения неравенства расчет идет по стрелке «Нет», где вновь вычисляется степень деформации разрушения без наличия дефекта (λ_{pp}). В случае выполнения неравенства расчеты делаются по стрелке «Да», и если $J < i$ то необходимо вернуться к расчетам, начиная с вычисления текущей деформации разрушения (λ_{pi}) в очередном проходе и т.д. Когда $i = n$, то расчеты направляются по стрелке «Да», где подсчитывается степень деформации разрушения, по которой можно судить, на сколько продеформировалась полоса до начала разрушения. Последним подсчитывается коэффициент, определяющий величину допустимого уровня использования ресурса пластичности прокатываемой полосы (α), после чего ведется печать результатов, и на этом расчеты заканчиваются.

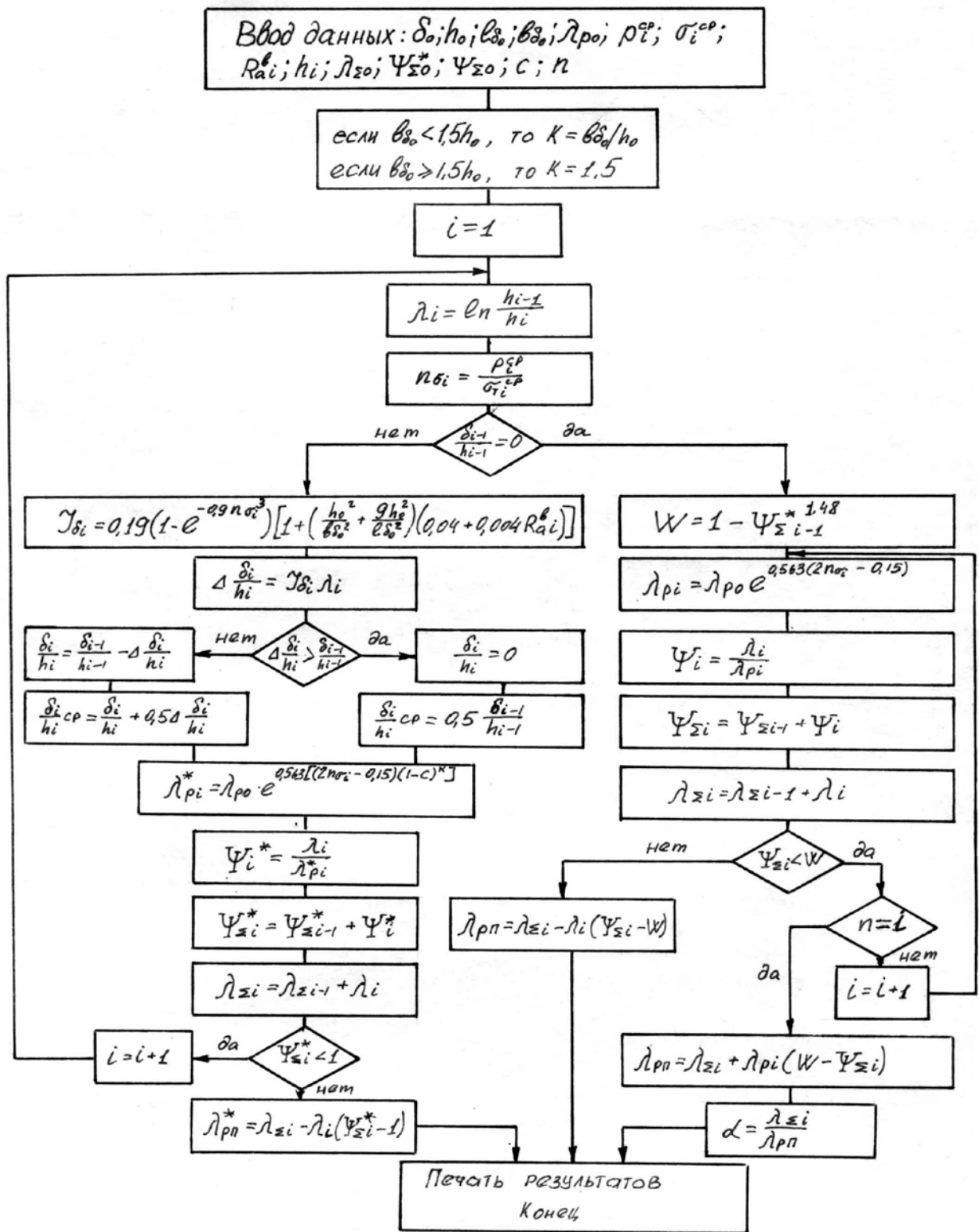


Рисунок 8.5 – Блок-схема алгоритма моделирования ресурса пластичности при холодной прокатке с учетом дефектов

Таблица 8.1 – Перечень идентификаторов, используемых в программе

Идентификаторы	Обозначения в тексте	Смысловое значение идентификаторов
N	n	Количество клетей
H(0)	h_0	Начальная толщина подката
H(I)	h_i	Текущая толщина подката
LAP0	λ_{p0}	Деформация разрушения при одноосном растяжении
C	C	Коэффициент
LAS(0)	$\lambda_{\Sigma 0}$	Суммарная деформация подката до прокатки
FSZ(0)	$\Psi_{\Sigma 0}^*$	Суммарный коэффициент использования ресурса пластичности на стадии выкатывания дефекта
FS(0)	$\Psi_{\Sigma 0}$	Суммарный коэффициент использования ресурса пластичности без учета дефекта
R(I)	R_{ai}^b	Шероховатость рабочих валков
P(I)	P_i^{cp}	Среднее контактное давление металла на рабочие валки
SM(I)	σ_i^{cp}	Средний предел текучести металла по клетям
DL	δ_0	Начальная глубина дефекта
K	K	Коэффициент, учитывающий влияние внешних зон
LA(I)	λ_i	Текущая деформация раската
NSM(I)	$n_{\sigma i}$	Напряженное состояние (коэффициент)
J(I)	$J_{\delta i}$	Критерий интенсивности сглаживания дефекта
D(I)	$\Delta \frac{\delta_i}{h_i}$	Отношение разности деформаций необходимых для сглаживания дефектов
Y(I)	$\frac{\delta_i}{h_i}$	Текущая деформация при сглаживании дефектов
Q(I)	$\frac{\delta_i}{h_i}^{cp}$	Среднее отношение деформации при сглаживании дефектов
W	W	Запас ресурса пластичности

Продолжение таблицы 8.1

Идентификаторы	Обозначения в тексте	Смысловое значение идентификаторов
FS(I)	Ψ_i^*	Текущий коэффициент использования ресурса пластичности с учетом дефекта
F(I)	Ψ_i	Текущий коэффициент использования ресурса пластичности без дефекта
FSZ(I)	$\Psi_{\Sigma i}^*$	Текущий суммарный коэффициент использования ресурса пластичности с учетом дефекта
FZ(I)	$\Psi_{\Sigma i}$	Текущий суммарный коэффициент использования ресурса пластичности без дефекта
LAPZ(I)	λ_{pi}^*	Текущая деформация разрушения для данных условий с учетом наличия дефектов
LAP(I)	λ_{pi}	Текущая деформация разрушения для данных условий без учета дефекта
MZ	$\lambda_{рп}^*$	Деформация разрушения металла при прокатке полосы с поверхностным дефектом
M	$\lambda_{рп}$	Деформация разрушения металла при прокатке полосы без дефекта
AL	α	Коэффициент, определяющий величину допустимого уровня использования ресурса пластичности

Текст программы расчета выкатываемости дефектов

```

10 N = 5
11 H(0) = 2.4
12 C = .9
13 LAPO = .74
14 LAS(0) = 0
15 FSZ(0) = 0
16 FS(0) = 0
20 DATA 1.6,1.2,0.8,0.61,0.4
30 FOR I = 1 TO N
35 READ H(I)
38 NEXT I
40 DATA 5, 5, 2.5, 5, 2.5
50 FOR I = 1 TO N: READ R(I): NEXT I
60 DATA 1.34, 1.31, 1.05, 1.3, 1.35
70 FOR I = 1 TO N: READ P(I): NEXT I
80 DATA 1, 1, 1, 1, 1
    
```



```

90 FOR I = 1 TO N: READ SM(I): NEXT I
100 DL = .09: L = 5: B = 3.6
110 IF B < 1.5 * H(0) THEN K = B / H(0) ELSE K = 1.5
120 FOR I = 1 TO N
130 LA(I) = LOG(H(I - 1) / H(I)): NEXT I
131 FOR I = 1 TO N
132 NSM(I) = P(I) / SM(I)
134 NEXT I
135 Y(0) = DL / H(0): V = H(0) ^ 2 / B ^ 2: VV = 9 * H(0) ^ 2 / L ^ 2
140 I = 1
150 IF I > N GOTO 330
160 IF Y(I - 1) = 0 THEN W = 1 - FSZ(I - 1) ^ 1.48: X = I - 1: GOTO 270
161 U(I) = -.9 * NSM(I) ^ 3
170 J(I) = .19 * (1 - EXP(U(I))) * (1 + (V + VV) * (.04 + .004 * R(I)))
180 D(I) = J(I) * LA(I)
190 IF D(I) > Y(I - 1) THEN Y(I) = 0 ELSE Y(I) = Y(I - 1) - D(I)
200 IF Y(I) = 0 THEN Q(I) = .5 * Y(I - 1) ELSE Q(I) = Y(I) + .5 * D(I)
205 NN(I) = .563 * (2 * NSM(I) - .15)
210 LAP(I) = LAPO * EXP(NN(I))
220 LAPZ(I) = LAPO * EXP(NN(I)) * (1 - C) ^ K
230 FZ(I) = LA(I) / LAPZ(I): F(I) = LA(I) / LAP(I)
240 FSZ(I) = FSZ(I - 1) + FZ(I): FS(I) = FS(I - 1) + F(I)
250 LAS(I) = LAS(I - 1) + LA(I)
255 IF FSZ(I) >= 1 THEN MZ = LAS(I) - LA(I) * (FSZ(I) - 1): GOTO 360
260 IF FSZ(I) < 1 THEN I = I + 1: GOTO 150
270 IF I > N GOTO 310
275 NN(I) = .563 * (2 * NSM(I) - .15)
280 LAP(I) = LAPO * EXP(NN(I))
290 F(I) = LA(I) / LAP(I): FS(I) = FS(I - 1) + F(I): LAS(I) = LAS(I - 1) + LA(I)
300 IF FS(I) < W THEN I = I + 1: GOTO 270: ELSE GOTO 320
310 M = LAS(N) + LAP(N) * (W - FS(N)): AL = LAS(N) / M: GOTO 390
320 M = LAS(I) - LA(I) * (FS(I) - W): GOTO 430
330 PRINT "ДЕФЕКТ НЕ ВЫКАТАН. РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН"
340 PRINT "ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ-"; MZ = LAS(N)
- LA(N) * (FSZ(I) - 1)
350 PRINT "ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛОСЫ СОСТАВИЛА-"; LAS(N): GOTO 460
360 PRINT "ДЕФЕКТ НЕ ВЫКАТАН."
370 PRINT "РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ РАСКАТА ИСЧЕРПАН В КЛЕТИ N"; I
380 PRINT "ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВИЛА-"; MZ: GOTO 460
390 PRINT "ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N"; X
400 PRINT "РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН"
410 PRINT "ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ-"; M
420 PRINT "КОЭФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ-"; AL: GOTO 460
430 PRINT "ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N"; X
440 PRINT "РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ РАСКАТА ИСЧЕРПАН В КЛЕТИ N"; I
450 PRINT "ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВИЛА-"; M
460 END

```

8.4 Моделирование ресурса пластичности и выкатываемости дефекта при холодной прокатке

Ниже представлены результаты математического моделирования на ЭВМ ресурса пластичности и выкатываемости дефектов при холодной прокатке на стане 1700 полос толщиной 0,6 мм (толщина подката 2,4 мм); 0,6 мм (толщина подката 3,0 мм); 1,5 мм (толщина подката 3,5 мм). Ширина полос 1000 мм.

ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .3

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.610596

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .860734

ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .2

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.610596

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .860734

ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .1

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.520603

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5499852

ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .05

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.520603

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5499852

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .5

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 3

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ РАСКАТА ИСЧЕРПАН В КЛЕТИ N 4

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВИЛА- 1.267009

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000
ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .3
ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2
РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.719428
КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .8463789

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000
ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .2
ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1
РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.521387
КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5771773

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000
ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .1
ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1
РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.521387
КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5771773

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000
ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .05
ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1
РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.521387
КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5771773

ПРОФИЛЬ 3,5-1,5 / 1000
ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .5
ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 4
РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.80174
КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .4702665

ПРОФИЛЬ 3,5-1,5 / 1000
ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .4

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 3
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.104786
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
 РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .4025578

ПРОФИЛЬ 3,5-1,5 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .3
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.496233
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
 РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .3394305

ПРОФИЛЬ 3,5-1,5 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .2
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.496233
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
 РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .3394305

ПРОФИЛЬ 3,5-1,5 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .1
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.848453
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
 РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .2974589

Итоговые данные о степени использования ресурса пластичности и выкатываемости дефектов приведены в таблице 8.2

Таблица 8.2 – СИРП (числитель) и номер клетки стана 1700, в который дефект выкатан (знаменатель)

Глубина дефекта, мм	Толщина подката/готового листа, мм		
	2,4/0,6	3,0/0,7	3,5/1,5
1	2	3	4
0,5	$\frac{1,2}{\text{дефект не выкатан}}$	$\frac{1,27}{3}$	$\frac{0,47}{4}$
0,4	$\frac{1,14}{3}$	$\frac{1,3}{2}$	$\frac{0,40}{3}$
0,3	$\frac{0,86}{2}$	$\frac{0,84}{2}$	$\frac{0,34}{2}$

Продолжение таблицы 8.2

1	2	3	4
0,2	$\frac{0,86}{2}$	$\frac{0,58}{1}$	$\frac{0,34}{2}$
0,1	$\frac{0,55}{1}$	$\frac{0,58}{1}$	$\frac{0,30}{1}$
0,05	$\frac{0,55}{1}$	$\frac{0,58}{1}$	$\frac{0,30}{1}$

Данные таблицы 8.2 отражают влияние исходной глубины дефекта на поверхности подката, соотношения толщины подката и готового листа (режима обжатий) на степень использования ресурса пластичности металла, характер трансформации дефектов в процессе холодной прокатки. Одна из общих закономерностей заключается в том, что чем больше глубина дефекта, тем больше степень использования ресурса пластичности (т. е. тем в большей мере исчерпывается ресурс пластичности металла в области залегания дефекта).

Имеется возможность идентификации рабочей клетки стана, в которой имеет место выкатывание поверхностного дефекта.

В целом результат математического моделирования ресурса пластичности металла при холодной прокатке на стане 1700 указывает на резервы технологии с точки зрения улучшения качества холоднокатаного листа, производимого из непрерывнолитого металла. Эти резервы могут быть реализованы, например, путём оптимизации режимов холодной прокатки по критерию минимума степени использования ресурса пластичности.

9 Оптимизация режимов холодной прокатки листа на стане 1700

9.1 Общие понятия об оптимизации технологических процессов

Сущность оптимизации с математической точки зрения сводится к следующему: требуется найти такие функции управления процессом, чтобы при заданных ограничениях реализовать экстремум так называемой целевой функции. Сущность оптимизации с технологической точки зрения сводится к следующему: требуется найти такой режим процесса прокатки, чтобы при заданных технологических ограничениях добиться наилучших результатов. Под оптимизацией понимают некоторую единую задачу с единой целью, а также подразумевают формулировку целевой функции и исследование решений, обеспечивающих экстремум функции цели [27].

В последние годы получили широкое развитие вопросы оптимизации режимов работы прокатных станов.

Остановимся кратко на общих понятиях, относящихся к вопросам оптимизации [30].

В математике число, зависящее от формы некоторого процесса, называется функционалом. Кривая, дающая минимум (максимум) функционалу, называется минималью (максималью). Задача отыскания минимали (максимали) трудна и, как правило, математические методы не приводят в общем случае прямо к явному определению минимали (максимали). Поэтому приходится варьировать кривыми с целью отыскания такой из них, которая обеспечила бы наискорейшее передвижение (минимум функционала времени); в этом случае будет найдено оптимальное управление, которое вообще в математике поднимется как наилучшее управление в каком-либо известном смысле.

При решении задач оптимизации приходится сталкиваться с ограничениями. В прокатке, например, обжатие может быть ограничено технологическими условиями, а усилие – работоспособностью подшипников и др.

В любом процессе параметры связаны определенными зависимостями. Совокупность формул и уравнений, описывающих процесс, называется математической моделью данного процесса. В общем понимании математическая модель – это тоже совокупность ограничений. Однако следует различать численно назначаемые ограничения в зависимости от конкретной задачи, от функций, отражающих рассматриваемый процесс.

Наличие ограничений значительно усложняет задачу оптимального управления, так как не позволяет применить к ней обычные классические методы вариационного исчисления. В оптимальном управлении используется множество различных методов, большинство из которых объединяет дискретный переход от одного состояния к другому в процессе поиска оптимального решения и использования вычислительной техники.

В общей постановке задачи любое состояние системы можно выразить ее фазовыми координатами (скоростью, температурой,

геометрическими координатами, размерами и пр.) в многомерном фазовом пространстве. Тогда под оптимальным управлением надо понимать такое управление, под влиянием которого точка фазового пространства из начального состояния переместится в конечное состояние так, что при этом критерий оптимальности будет минимальным (максимальным). Таким образом, функционал и является критерием оптимальности в задачах оптимального управления.

Задачи оптимизации процессов прокатки решаются при определенных ограничениях, определяемых конструктивными параметрами стана и требованиями технологии прокатки. К ним относятся размеры валков, которые предполагаются известными; допустимые значения усилия и момента прокатки из условия работоспособности конструкции стана; предельное значение среднего удельного давления из условия стойкости материала рабочих валков; параметры электродвигателя (если двигатель не выбран, то задаются фиктивные его параметры, не превышающие желаемых пределов); предельное значение среднеквадратичного момента двигателя и др. Устанавливаются ограничения по проходам на максимальные и минимальные значения следующих параметров: полных и удельных переднего и заднего натяжений, относительного обжатия, отношения удельного натяжения к пределу текучести материала, разности между передним и задним натяжениями. Коэффициент трения в очаге деформации задается в виде функции скорости прокатки [28].

Количественным выражением степени достижения той или иной цели служит соответствующий критерий оптимальности. Указать универсальный критерий оптимальности производственной системы в силу ее многоцелевого характера трудно.

В условиях работы цеха металлургического предприятия в качестве критерия оптимальности может быть выбран один из технико-экономических показателей: производительность, качество продукции, величина приведенных затрат и т.д. Множественность критериев ставит проблему целевой ориентации проводимого операционного исследования. Эта проблема решается сравнительно просто, когда интересующие исследователя критерии оказываются непротиворечивыми, т.е. изменение одного критерия в благоприятную сторону ведет к благоприятному изменению другого.

Процесс непрерывной прокатки обладает рядом особенностей, которые усложняют и затрудняют разработку оптимальных технологических процессов. Одна из трудностей состоит в том, что возникающие задачи оптимизации требуют учета многочисленных факторов, связанных между собой. При этом режимы непрерывной прокатки во многом определяют качество готового продукта.

В нашем случае в качестве критерия оптимизации принят минимум степени использования ресурса пластичности металла, накопленного за весь процесс непрерывной холодной прокатки.

Оптимизация режимов прокатки по этому критерию позволит минимизировать вероятность разрушения полос в межклетевых промежутках непрерывного стана, добиться выкатываемости дефектов.

Следствием этого будет улучшение качества готовой жести (за счет уменьшения количества поверхностных дефектов), увеличение производительности стана [5].

9.2 Алгоритм оптимизации режимов прокатки по критерию минимума СИРП

Цель оптимизации – нахождение параметров настройки стана, обеспечивающих наилучшие режимы прокатки с точки зрения определенных критериев. В общем виде режимы прокатки составляют: обжатия по клетям, натяжения между клетями и скорость полосы на выходе из стана [6, 7].

Первичным критерием оптимизации является запас ресурса пластичности прокатываемой полосы на выходе из клетки, а в целом – на выходе из стана, подлежащий минимизации. При этом необходимо найти такую совокупность обжатий и натяжений по клетям, при которой соблюдались бы определенные условия и ограничения. Такой совокупности, как правило, может удовлетворять множество различных режимов прокатки, из которых целесообразно выделить тот режим, который удовлетворял бы вторичным критериям оптимальности (системе ограничений).

В качестве таких вторичных критериев оптимальности при прокатке могут быть приняты:

- 1) максимальное удельное давление металла на валки не должно быть выше допустимого удельного давления на валки;
- 2) мощность прокатки не должна превышать 0,85 мощности двигателя привода клетки;
- 3) полное давление металла на валки не должно превышать максимального полного давления на нажимные винты клетки.

В алгоритме первичной настройки стана в качестве независимых варьируемых параметров используют: обжатие полосы по проходам, натяжение полосы между клетями.

Особенностью стратегии расчета является нахождение существующего решения при данных обжатиях и натяжениях. Расчет начинается с максимальной толщины для данного прохода, которая дискретно уменьшается. Для каждой текущей толщины просчитывается весь спектр межклетевых удельных натяжений, начиная с максимального.

Так как запас ресурса пластичности не обладает свойством аддитивности, задачи решаются отдельно для каждой дискретно меняющегося обжатия.

Определение оптимальных режимов прокатки в пределах всего спектра обжатий и натяжений производится методом случайного поиска. Шаговая процедура предопределена расчетом каждой клетки; численная процедура расчета осуществляется от первой клетки к последней.

В качестве параметра состояния перед каждой клетью принимается двумерный вектор, включающий толщину и относительное удельное натяжение полосы на входе в клеть.

Для решения данной задачи вначале необходимо задать ограничения обжатия по клетям, а именно E_{\max} и E_{\min} . Исходя из этого, для всего стана делается расчет минимальных и максимальных толщин. Так для первой клетки, зная h_0 , находим $h_{1\max}$ и $h_{1\min}$. В свою очередь эти значения толщины являются начальными для следующей клетки, т.е. $h_{0\max}$ и $h_{0\min}$ и т.д. Таким образом получается технологический конус толщин с вершиной в. Вторым этапом рассчитывается технологический конус с вершиной в h_k , т.е. расчеты ведутся от последней клетки. Тем самым мы находим $h_{0\max}$ и $h_{0\min}$ для каждой клетки, которые в свою очередь являются $h_{1\max}$ и $h_{1\min}$ для предыдущей клетки.

После определения технологических конусов с вершинами в h_0 и h_k их необходимо совместить друг с другом строго по номерам клетей и для каждой клетки из двух значений h_{\max} выбрать меньшее значение, а из двух значений h_{\min} – большее. Таким образом получается область толщин, в которой мы будем оперировать с целью отыскания наиболее оптимального режима прокатки. Следующим этапом является определение шага движения от максимальной толщины к минимальной. Устанавливаются верхний и нижний пределы натяжений. Исходя из наработанного опыта прокатки верхний предел составляет $0,4\sigma_{si}$, а нижний $0,15\sigma_{si}$. Заднее натяжение для первой клетки фиксируется и примерно составляет максимум натяжения, которое может обеспечить разматыватель стана.

Для первой клетки исходная толщина подката до входа в клеть и заднее натяжение являются фиксированными, а толщина после прохода и переднее натяжение варьируются. Вначале берется максимальная толщина выхода полосы, запоминается и для нее с различными уровнями натяжений находятся следующие значения:

- 1) средний предел текучести материала, σ_{si} ;
- 2) среднее удельное давление металла на валки, p_{cp} ;
- 3) максимальное удельное давление металла на валки, p_{\max} ;
- 4) полное давление металла на валки, p ;
- 5) отношение максимального удельного давления в очаге деформации к среднему удельному давлению, K ;
- 6) момент прокатки, $M_{пр}$;
- 7) мощность прокатки, $N_{пр}$;
- 8) запас ресурса пластичности материала, $\psi_{\Sigma i}$;
- 9) суммарное обжатие полосы после прохода в клетки, $E_{\Sigma i}$;
- 10) суммарное обжатие полосы до прохода в данной клетки, $E_{\Sigma 0i-1}$;
- 11) частное обжатие полосы в данной клетки, E_i .

Следует отметить, что обжатия полосы не зависят от ее натяжения и определяется исходя из начальной и конечной толщины в данном проходе.

В результате получается линейка различных показателей для данной толщины, но различным уровнем натяжения. Та часть из них, которые не

будут отвечать хотя бы одному из критериев, указанных выше под номерами 3, 4, 7 – обнуляются, а из оставшихся выбираются те, у которых меньшее значение $\psi_{\Sigma i}$. При этом $\psi_{\Sigma i}$ не должно превышать 1. Если такое происходит, то для этой толщины решений нет и все значения обнуляются. Затем следует уменьшение толщины выходящей полосы на один шаг и вся процедура повторяется.

Для следующей клетки задача решается аналогично, за исключением того, что h_0 имеет несколько значений, которые вначале поочередно подставляются для $h_{1\max}$ и т.д.

Затем, как будет определена линейка оставшихся значений после отсортировки вторичными критериями после прохода в последней клетки, выбираются те значения у которых $\Psi_{\Sigma N}$ минимальное. Эти значения запоминаются как окончательные.

Обратным ходом, зная что $E_{\Sigma 0i} = E_{\Sigma 1i-1}$, находятся все значения в предыдущих клетях. После чего вся информация выводится на распечатывающее устройство.

9.3 Программа оптимизации режимов холодной прокатки листа на стане 1700

Для пояснения используемой методики оптимизации далее кратко опишем программу метода случайного поиска.

При прокатке на пятиклетевом непрерывном стане с заданными натяжениями при нахождении режима обжатий обеспечивающий равенство давления на валки в отдельных клетях можно решить поставленную задачу методом случайного поиска. Этот метод заключается в том, что просматриваемое ограниченное подмножество вариантов выбирают случайным образом, что позволяет более или менее равномерно просмотреть все подмножество вариантов и гарантирует от какой-нибудь односторонней схемы выбора «пробных вариантов».

По мере увеличения числа рассмотренных вариантов возрастает вероятность получения оптимального решения задачи.

Расчет по приведенному алгоритму организован по принципу «цикл в цикле». Параметром первого цикла является количество клеток стана. Блок-схема алгоритма программы оптимизации методом случайного поиска показана на рисунке 9.1. Идентификаторы к программе расчета параметров холодной прокатки листа с учетом СИРП на непрерывном стане приведены в таблице 9.1.

Рассмотрим работу алгоритма. В блоке ввода данных, кроме ввода начальных значений независимых переменных M и B , присваиваются значения начальной толщины подката и конечной толщины полосы соответственно. В следующем блоке под именем Y находится полное абсолютное обжатие. Блоком ниже счетчику всех перебранных программой вариантов $T1$ присваивается начальное значение равное нулю, а также присваиваются переменные $A(0)$ и $X(0)$ начальные значения толщины

горячекатаного подката. Далее создается цикл количества необходимых вариантов получения данных, внутри которого присваиваются нулевые значения текущему счетчику перебранных вариантов T и текущему абсолютному обжатию S.

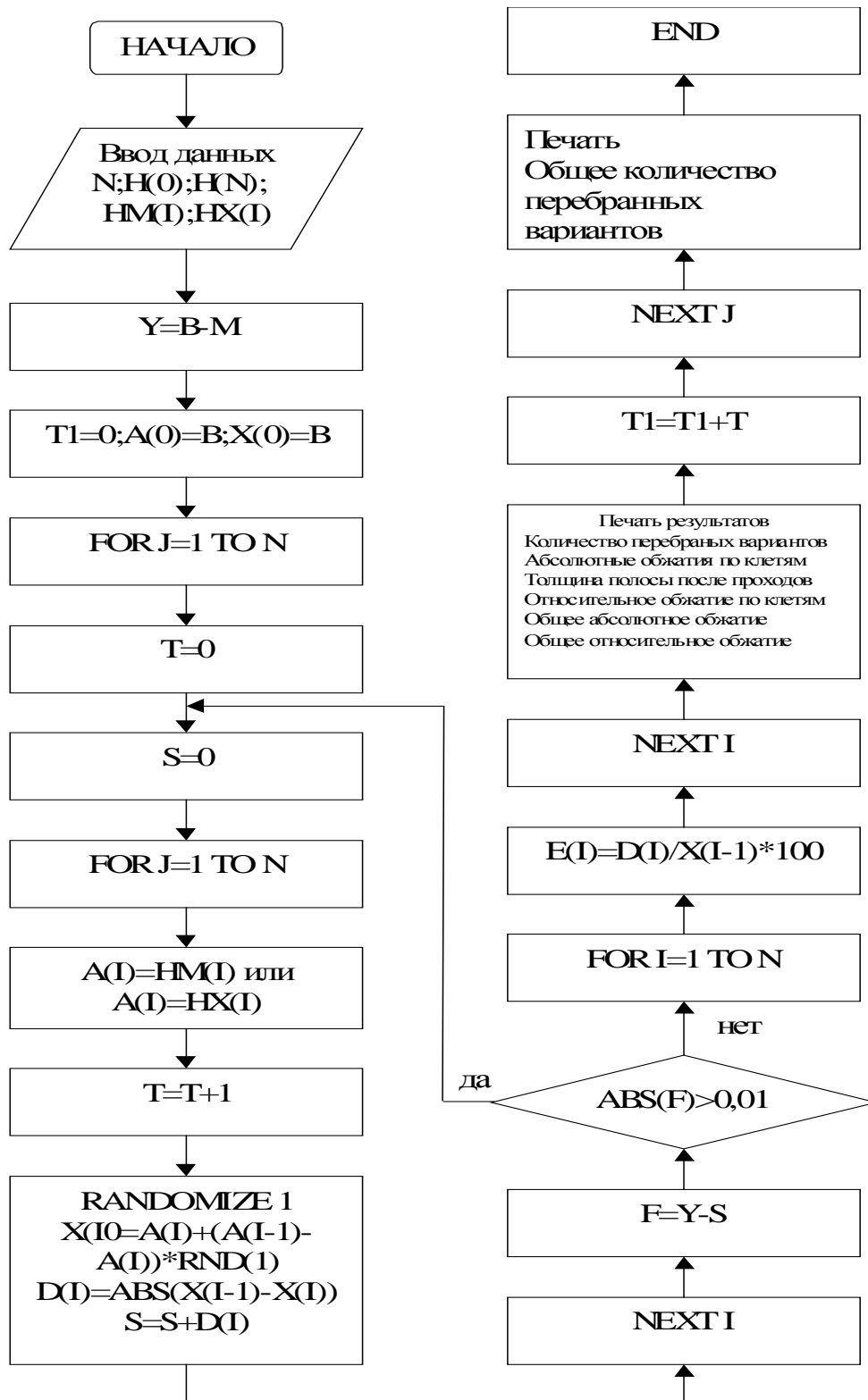


Рисунок 9.1 – Блок-схема алгоритма программы оптимизации методом случайного поиска

Таблица 9.1 – Идентификаторы к программе расчета параметров холодной прокатки листа с учетом СИРП на непрерывном стане

№№ пп	Параметры	Условное обозначение	Идентиф икаторы	Размер ность
1	2	3	4	5
1	Толщина подката	h_0	H(0)	мм
2	Толщина полосы за последней клетью	h_k	H(N)	мм
3	Толщина полосы до входа в i-ю клеть	h_{oi}	H1(I-1,T)	мм
4	Толщина после i-той клетки	h_{li}	H1(I,T)	мм
5	Суммарное относительное обжатие в проходах, предшествующих данному	ε_0	E0	%
6	Суммарное относительное обжатие с учетом данного прохода	ε_1	E1	%
7	Относительное обжатие в i-той клетки	ε	E	%
8	Радиус рабочих валков	R	R	мм
9	Шероховатость рабочих валков	R_z	RA	мкм
10	Ширина прокатываемой полосы	b	B	мм
11	Число клетей стана	n	N	шт
12	Максимальная толщина полосы до входа в i-ю клеть	h_{maxi}	HX(I)	мм
13	Минимальная толщина полосы до входа в i-ю клеть	h_{mini}	HM(I)	мм
14	Величина шага между HX(I) и HM(I)	P_K	PR	мм
15	Максимальное частное обжатие в i-той клетки	ε_{maxi}	EX(I)	%
16	Минимальное частное обжатие в i-той клетки	ε_{mini}	EM(I)	%
17	Коэффициент, зависящий от механических свойств материала валков	m	M	-
18	Исходный предел текучести полосы	σ_{T0}	ST	МПа
19	Средний предел текучести в очаге деформации	σ_{TC}	SC	МПа
20	Коэффициент, учитывающий марку прокатываемой стали	a_T	AT	-

Продолжение таблицы 9.1

1	2	3	4	5
21	Коэффициент, учитывающий природу смазки	$K_{см}$	KSM	-
22	Кинематическая вязкость смазки при 50°C	ν_{50}	U5	Сст
23	Скорость полосы на выходе из последней клетки	$\nu_{п}$	SK(N)	м/с
24	Скорость полосы после прокатки в i-той клетки	$\nu_{пи}$	SK1(I)	м/с
25	Окружная скорость валков	$\nu_{в}$	VB	м/с
26	Удельное заднее натяжение	q_0	Q(I-1,T)	МПа
27	Удельное переднее натяжение	q_1	Q(I,T)	МПа
28	Коэффициент трения при установившемся процессе прокатки	f	F	-
29	Приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков	X_0	X0	мм
30	Длина дуги контакта с учетом упругой деформации валков	l_c	LC	мм
31	Длина дуги зоны отставания	l_1	L1	мм
32	Длина дуги зоны опережения	l_2	L2	мм
33	Относительная длина дуги зоны отставания	l_{01}	L3	мм
34	Относительная длина дуги зоны опережения	l_{02}	L4	мм
35	Угол захвата с учетом упругой деформации валков	α_c	AC	мм
36	Отношение нейтрального угла захвата к углу захвата	$\frac{\gamma}{\alpha_c}$	S	-
37	Высота полосы в нейтральном сечении	h_n	НН	мм
38	Средняя высота полосы в зоне отставания	h_{c1}	Н2	мм
39	Средняя высота полосы в зоне опережения	h_{c2}	Н3	мм
40	Показатель силы трения в зоне отставания	f_{c1}	F2	-
41	Показатель силы трения в зоне опережения	f_{c2}	F3	-

Продолжение таблицы 9.1

1	2	3	4	5
42	Коэффициент, учитывающий положение центра тяжести эпюры предела текучести	a	A	-
43	Коэффициент, учитывающий распределение предела текучести в зоне отставания	K_1	K1	-
44	Коэффициент, учитывающий распределение предела текучести в зоне опережения	K_2	K2	-
45	Коэффициент плеча равнодействующей в зоне отставания	Ψ_1	Y1	-
46	Коэффициент плеча равнодействующей в зоне опережения	Ψ_2	Y2	-
47	Коэффициент плеча равнодействующей относительно вертикальной оси сплющенной дуги	Ψ_c	Yc	-
48	Коэффициент плеча равнодействующей относительно вертикальной оси валков	Ψ	Y	-
49	Коэффициент положения центра тяжести эпюры предела текучести для зоны отставания	a_1	A1	-
50	Коэффициент положения центра тяжести эпюры предела текучести для зоны опережения	a_2	A2	-
51	Коэффициент продольного напряжения в зоне отставания	w_1	W1	-
52	Коэффициент продольного напряжения в зоне опережения	w_2	W2	-
53	Коэффициент вертикального напряжения в зоне отставания	n_1	N1	-
54	Коэффициент вертикального напряжения в зоне опережения	n_2	N2	-
55	Коэффициент вертикального напряжения для всего очага деформации	n_p	NP	-

Продолжение таблицы 9.1

1	2	3	4	5
56	Среднее давление в зоне отставания	P_1	P1	МПа
57	Среднее давление в зоне опережения	P_2	P2	МПа
58	Среднее давление в очаге деформации	P_c	PC	МПа
59	Максимальное среднее давление в очаге деформации	P_m	PM	МПа
60	Полное давление металла на валки	P_{Π}	PP	МН
61	Момент, необходимый для деформации	M_d	MD	МН·м
62	Мощность прокатки	N_d	ND	кВт
63	Коэффициент, равный отношению максимального давления в очаге деформации к среднему	K_p	KP	-
64	Номинальная мощность двигателя	$N_{ном}$	NNOM	кВт
65	Максимально допустимое давление металла на валки	$P_{доп}$	PPD	МН
66	Суммарная величина деформации	$\lambda_{\Sigma i}$	LA(I)	-
67	Величина деформации металла до разрушения	λ_p	LAP	-
68	Суммарный коэффициент использования ресурса пластичности	$\Psi_{\Sigma i}$	FS	-

Не выходя из первого цикла создается второй, где, собственно говоря, и организован перебор всех случайных абсолютных обжатий по клетям и их полных сумм.

В начале второго цикла текущий переменной A(I) присваивается одно из текущих значений предполагаемых толщин по клетям, которые были введены ранее в блоке ввода данных.

В следующем блоке включается в работу счетчик текущего перебора данных. В блоке, находящемся в нижнем левом углу рисунка 9.1 и организован весь режим перебора абсолютных обжатий, и нахождение их суммы.

После окончания цикла находится разница (F) между необходимым нам полным абсолютным обжатием Y и полученным программой в результате случайного взятия чисел из генератора случайных чисел.

Далее, в блоке сравнения идет оценка этой разности по абсолютному значению. Если эта разность выше заданной точности, то программа отправляется вновь по второму циклу, предварительно обнулив текущее абсолютное обжатие S. Если же абсолютное значение разницы F меньше заданной точности, то программа идет к следующему циклу, где рассчитываются частные обжатия.

Следующим шагом идет распечатка данных одного из выбранных вариантов. Затем включается в работу счетчик общего количества перебранных вариантов.

Далее программа отправляется к началу первого цикла, где вся процедура повторяется вновь и, после отыскания всего количества заданных вариантов, начиная с первого варианта обжатий, и кончая последним.

Текст программы расчета режимов холодной прокатки с целью оптимизации по критерию ресурса пластичности приведен в приложении А.

9.4 Оптимизация режимов холодной прокатки листа на стане 1700

Для иллюстрации расчета оптимальных режимов холодной прокатки на стане 1700 АО «АрселорМиттал Темиртау» выбрано два профиля: 1100×2,0 мм, прокатываемого до толщины 0,4 мм и 1000×2,4 мм – до толщины 0,6 мм.

Расчет режимов обжатий для клетей пятиклетевого стана 1700 холодной прокатки выполнен с помощью программы оптимизации методом случайного поиска.

Ниже приведено 5 вариантов обжатий по клетям для профиля 1100×2,0 мм прокатываемого до толщины 0,4 мм, в форме, выдаваемом программой. Всего переработано 25 вариантов режимов.

Количество перебранных вариантов - 5

Абсолютные обжатия по клетям, мм:

1 - .1739935 2 - .71228 3 - .4752011 4 - .1528293 5 - 8.569604E-02

Толщина полосы после проходов, мм:

1 - 1.826007 2 - 1.113726 3 - .6385254 4 - .485696 5 - .4

Относительные обжатия по клетям, %:

1 - 8.699674 2 - 39.00753 3 - 42.66767 4 - 23.93473 5 - 17.64396

Общее абсолютное обжатие, мм - 1.6

Общее относительное обжатие, % - 79.99999

Количество перебранных вариантов - 5

Абсолютные обжатия по клетям, мм:

1 - .3745915 2 - .4754274 3 - .3620625 4 - .3250579 5 - 6.286073E-02

Толщина полосы после проходов, мм:

1 - 1.625409 2 - 1.149981 3 - .7879186 4 - .4628607 5 - .4

Относительные обжатия по клетям, %:

1 - 18.72957 2 - 29.24972 3 - 31.48421 4 - 41.25526 5 - 13.58092

Общее абсолютное обжатие, мм - 1.6
Общее относительное обжатие, % - 80
Количество перебранных вариантов - 5
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - .4615375 2 - .6863388 3 - .1611144 4 - .2843551 5 - 6.654203E-03
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 1.538463 2 - .8521237 3 - .6910093 4 - .4066542 5 - .4
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 23.07687 2 - 44.61199 3 - 18.90739 4 - 41.15069 5 - 1.63633

Общее абсолютное обжатие, мм - 1.6
Общее относительное обжатие, % - 80.00001
Количество перебранных вариантов - 5
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - .3083646 2 - .7873248 3 - .235732 4 - .2394935 5 - 2.908501E-02
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 1.691635 2 - .9043105 3 - .6685785 4 - .429085 5 - .4
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 15.41823 2 - 46.54223 3 - 26.0676 4 - 35.8213 5 - 6.778379

Общее абсолютное обжатие, мм - 1.6
Общее относительное обжатие, % - 80.00001
Количество перебранных вариантов - 5
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - 9.794497E-02 2 - .8079822 3 - .4170946 4 - .2297349 5 - 4.724327E-02
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 1.902055 2 - 1.094073 3 - .6769782 4 - .4472433 5 - .4
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 4.897249 2 - 42.47943 3 - 38.12312 4 - 33.93535 5 - 10.56321

Общее абсолютное обжатие, мм - 1.6
Общее относительное обжатие, % - 80
Далее приведено 5 вариантов обжатий по клетям для профиля 1000×2,4 мм прокатываемого до толщины 0,6 мм. Всего переработано 85 вариантов обжатий.

Количество перебранных вариантов - 30
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - .1744015 2 - 1.004683 3 - .24181 4 - .3272754 5 - 4.334885E-02
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 2.225599 2 - 1.220916 3 - .9791057 4 - .6518303 5 - .6084815
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 7.26673 2 - 45.14214 3 - 19.80562 4 - 33.42595 5 - 6.650327
Общее абсолютное обжатие, мм - 1.791519
Общее относительное обжатие, % - 74.64661
Количество перебранных вариантов - 5
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - .6470504 2 - .4476997 3 - .3971752 4 - .1831843 5 - .1200926
Толщина полосы после проходов, мм:

1 - 1.75295 2 - 1.30525 3 - .9080749 4 - .7248906 5 - .604798
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 26.96043 2 - 25.53979 3 - 30.42905 4 - 20.17282 5 - 16.567
Общее абсолютное обжатие, мм - 1.795202
Общее относительное обжатие, % - 74.80009
Количество перебранных вариантов - 20
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - 3.821445E-02 2 - .8950338 3 - .5227081 4 - .2242802 5 - .1098386
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 2.361786 2 - 1.466752 3 - .9440438 4 - .7197636 5 - .609925
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 1.592268 2 - 37.89649 3 - 35.63712 4 - 23.75739 5 - 15.26037
Общее абсолютное обжатие, мм - 1.790075
Общее относительное обжатие, % - 74.58646
Количество перебранных вариантов - 10
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - .1824124 2 - .9793683 3 - .2927598 4 - .2590217 5 - .0831871
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 2.217588 2 - 1.238219 3 - .9454595 4 - .6864378 5 - .6032507
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 7.600516 2 - 44.16368 3 - 23.64362 4 - 27.39638 5 - 12.11866
Общее абсолютное обжатие, мм - 1.796749
Общее относительное обжатие, % - 74.86456
Количество перебранных вариантов - 20
Абсолютные обжатия по клетям, мм:
1 - .3426325 2 - .473073 3 - .6117589 4 - .2502086 5 - .1149656
Толщина полосы после проходов, мм:
1 - 2.057368 2 - 1.584295 3 - .9725357 4 - .7223271 5 - .6073615
Относительные обжатия по клетям, %:
1 - 14.27635 2 - 22.99409 3 - 38.61396 4 - 25.72744 5 - 15.91601
Общее абсолютное обжатие, мм - 1.792639
Общее относительное обжатие, % - 74.69328

По этим обжатиям проводится расчет параметров холодной прокатки и СИРП, используя методику и программу, разработанную и апробированную ранее.

Результаты расчета по одному из вариантов режимов обжатий приведены ниже.

Клеть № 1

Суммарное относительное обжатие до входа в клеть 0 %

Суммарное относительное обжатие после выхода из клетки 8.700001 %

Частное относительное обжатие 8.700001 %

Толщина полосы до входа в клеть 2 мм

Толщина полосы после выхода из клетки 1.826 мм

Скорость полосы до входа в клеть 5 м/с

Скорость полосы после выхода из клетки 5.476451 м/с

Заднее натяжение полосы 44.54546 МПа
Переднее натяжение полосы 151.2496 МПа
Средний удельный предел текучести металла 349.5692 МПа
Среднее удельное давление металла на валки 313.7138 МПа
Полное давление металла на валки 254.4108 т
Приведенная мощность на валу двигателя 290.6111 кВт
Использованный ресурс пластичности 4.872157E-02
Клеть № 2
Суммарное относительное обжатие до входа в клеть 8.700001 %
Суммарное относительное обжатие после выхода из клетки 44.3 %
Частное относительное обжатие 38.99233 %
Толщина полосы до входа в клеть 1.826 мм
Толщина полосы после выхода из клетки 1.114 мм
Скорость полосы до входа в клеть 5.476451 м/с
Скорость полосы после выхода из клетки 8.976661 м/с
Заднее натяжение полосы 151.2496 МПа
Переднее натяжение полосы 159.9478 МПа
Средний удельный предел текучести металла 555.1194 МПа
Среднее удельное давление металла на валки 651.2022 МПа
Полное давление металла на валки 1068.275 т
Приведенная мощность на валу двигателя 2777.544 кВт
Использованный ресурс пластичности .2783811
Клеть № 3
Суммарное относительное обжатие до входа в клеть 44.3 %
Суммарное относительное обжатие после выхода из клетки 68.1 %
Частное относительное обжатие 42.7289 %
Толщина полосы до входа в клеть 1.114 мм
Толщина полосы после выхода из клетки .638 мм
Скорость полосы до входа в клеть 8.976661 м/с
Скорость полосы после выхода из клетки 15.67398 м/с
Заднее натяжение полосы 159.9478 МПа
Переднее натяжение полосы 167.5691 МПа
Средний удельный предел текучести металла 652.1666 МПа
Среднее удельное давление металла на валки 1388.969 МПа
Полное давление металла на валки 1863.045 т
Приведенная мощность на валу двигателя 7801.694 кВт
Использованный ресурс пластичности .4310784
Клеть № 4
Суммарное относительное обжатие до входа в клеть 68.1 %
Суммарное относительное обжатие после выхода из клетки 75.75 %
Частное относительное обжатие 23.98119 %
Толщина полосы до входа в клеть .638 мм
Толщина полосы после выхода из клетки .485 мм
Скорость полосы до входа в клеть 15.67398 м/с
Скорость полосы после выхода из клетки 20.61856 м/с

Заднее натяжение полосы 167.5691 МПа
Переднее натяжение полосы 146.9541 МПа
Средний удельный предел текучести металла 680.3166 МПа
Среднее удельное давление металла на валки 1209.962 МПа
Полное давление металла на валки 920.1205 т
Приведенная мощность на валу двигателя 3545.036 кВт
Использованный ресурс пластичности .7122754
Клеть № 5
Суммарное относительное обжатие до входа в клеть 75.75 %
Суммарное относительное обжатие после выхода из клетки 80 %
Частное относительное обжатие 17.52577 %
Толщина полосы до входа в клеть .485 мм
Толщина полосы после выхода из клетки .4 мм
Скорость полосы до входа в клеть 20.61856 м/с
Скорость полосы после выхода из клетки 25 м/с
Заднее натяжение полосы 146.9541 МПа
Переднее натяжение полосы 49 МПа
Средний удельный предел текучести металла 695.4632 МПа
Среднее удельное давление металла на валки 2489.517 МПа
Полное давление металла на валки 1411.08 т
Приведенная мощность на валу двигателя 5981.489 кВт
Использованный ресурс пластичности .7543106

Аналогично рассчитывается каждый вариант режима обжатий.

Далее для каждого профиля из рассчитанных режимов обжатий выбирается вариант обжатий с минимальным значением СИРП и параметрами прокатки (усилием, мощностью и т.д.), не превышающими допустимые из системы ограничений.

Соответствующие оптимальным режимам, рассчитаны параметры прокатки и СИРП для цеховых режимов обжатий двух указанных профилей. Ниже приводится их сопоставительный анализ применительно к профилям 1100×0,4 мм и 1000×0,6 мм.

9.5 Анализ расчетных данных энергосиловых параметров холодной прокатки листа на стане 1700

Для сопоставительного анализа построены графики распределения СИРП и параметров прокатки по клетям (рисунки 9.2-9.9).

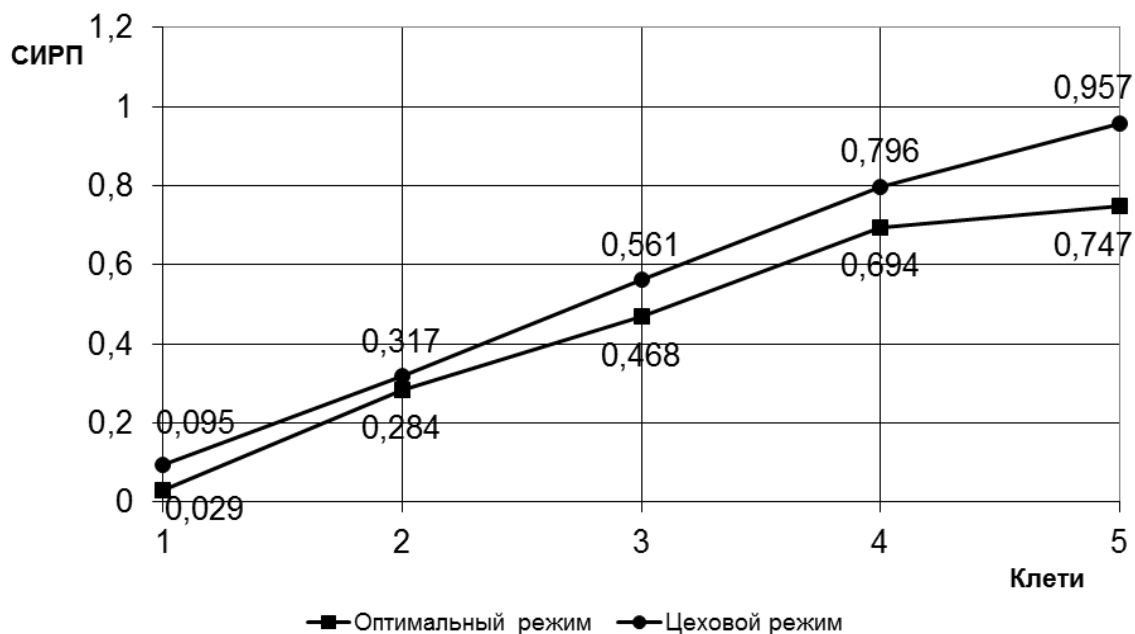


Рисунок 9.2 – Значения СИРП для цеховых и оптимальных режимов обжатий. Профиль 1100×0,4 мм

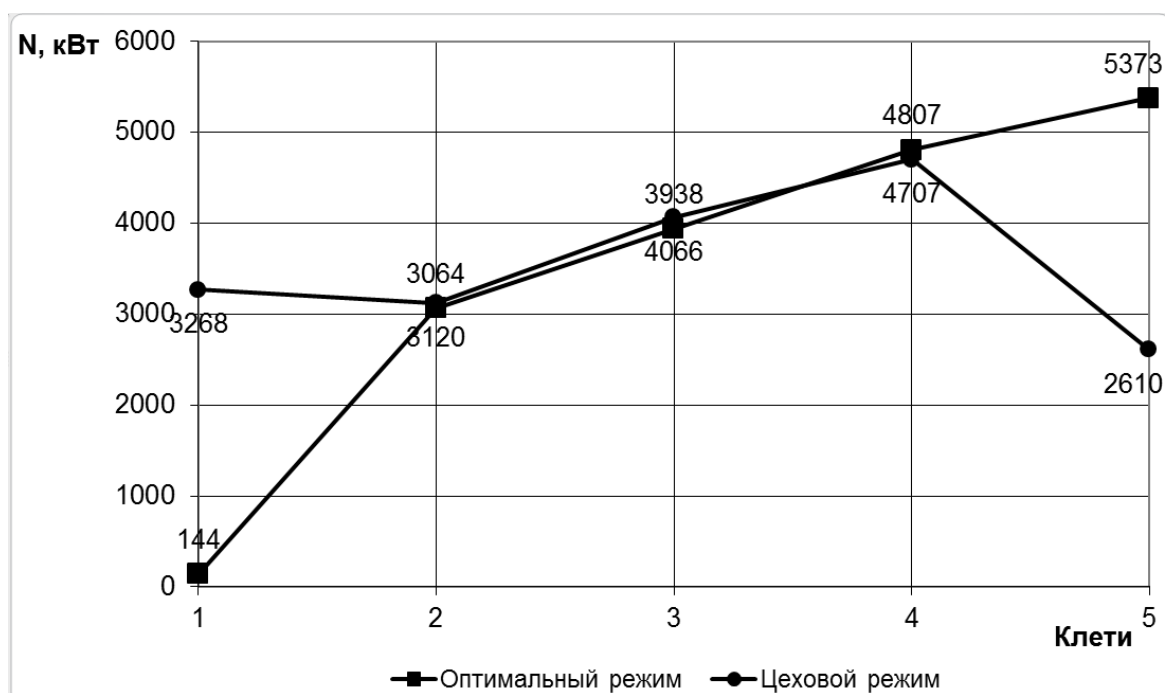


Рисунок 9.3 – Мощности прокатки по цеховым и оптимальным режимам. Профиль 1100×0,4 мм

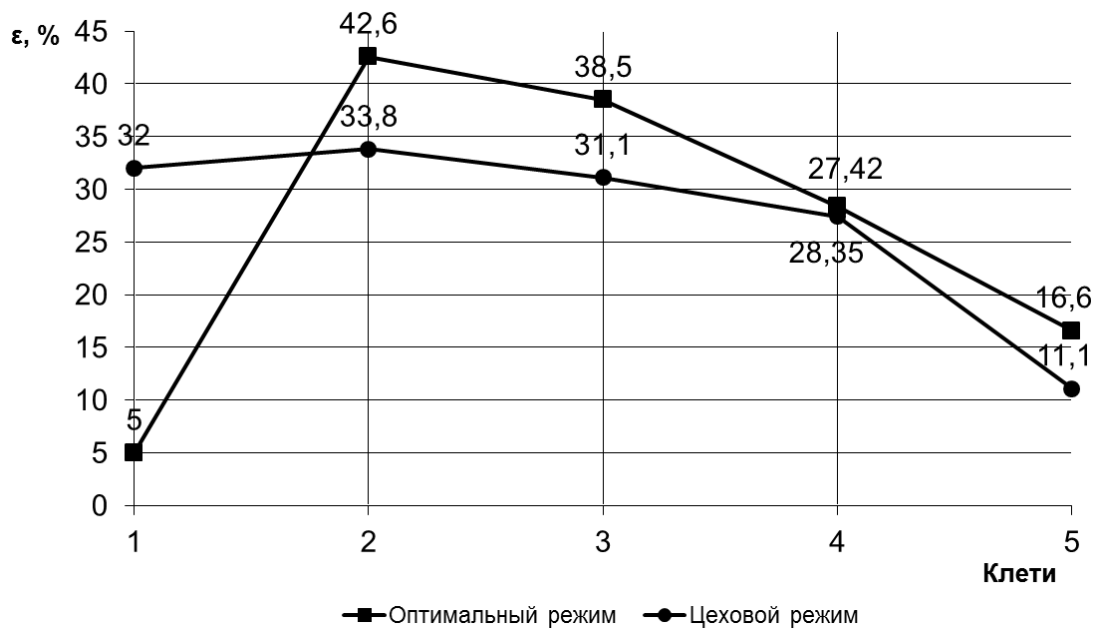


Рисунок 9.4 – Оптимальные и цеховые режимы обжатий. Профиль 1100×0,4 мм

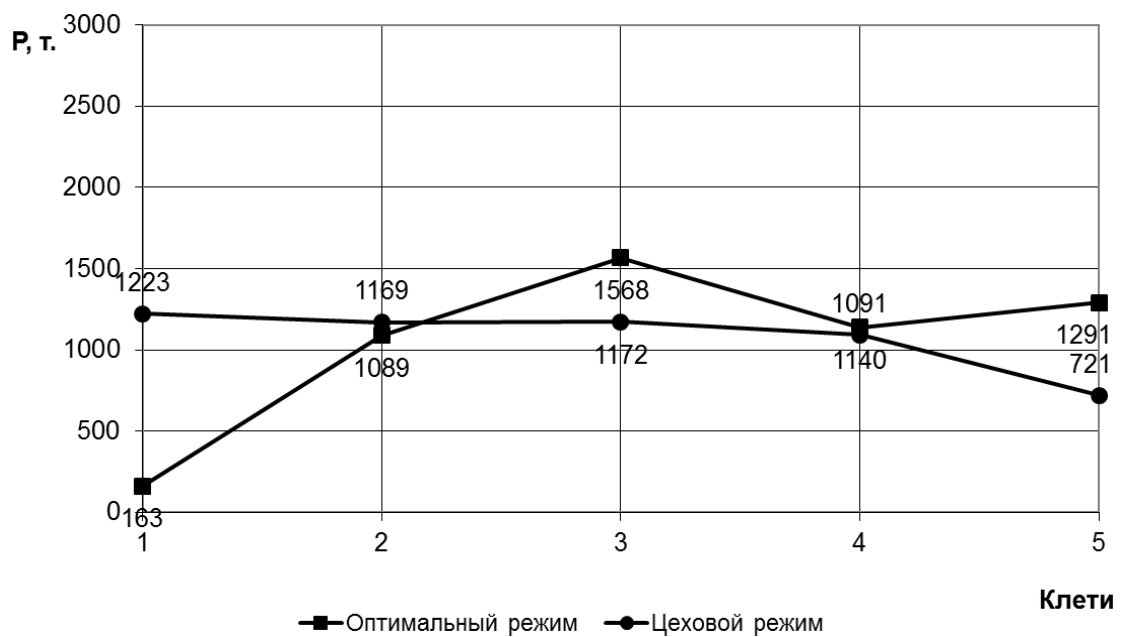


Рисунок 9.5 – Полное усилие прокатки. Профиль 1100×0,4 мм

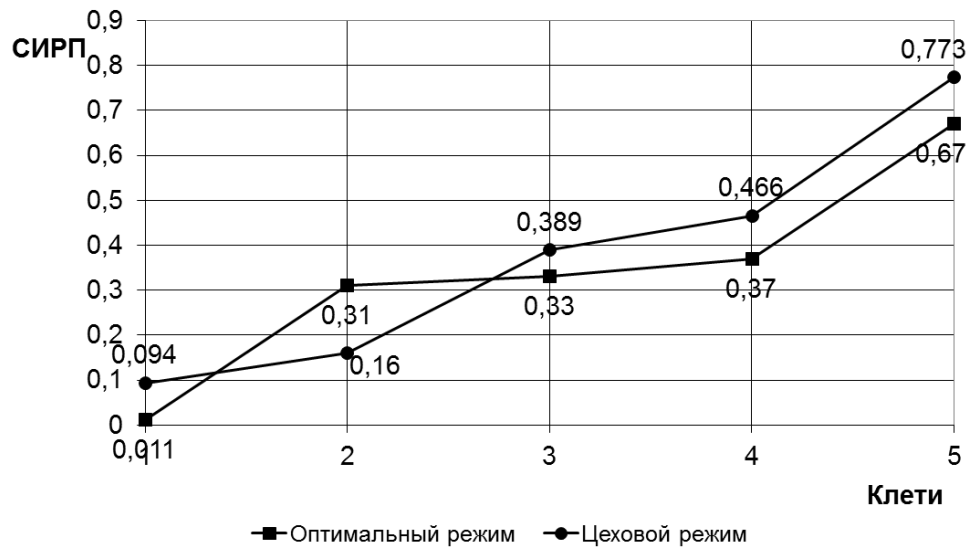


Рисунок 9.6 – Значения СИРП для цеховых и оптимальных режимов обжатий. Профиль 1000×0,6 мм

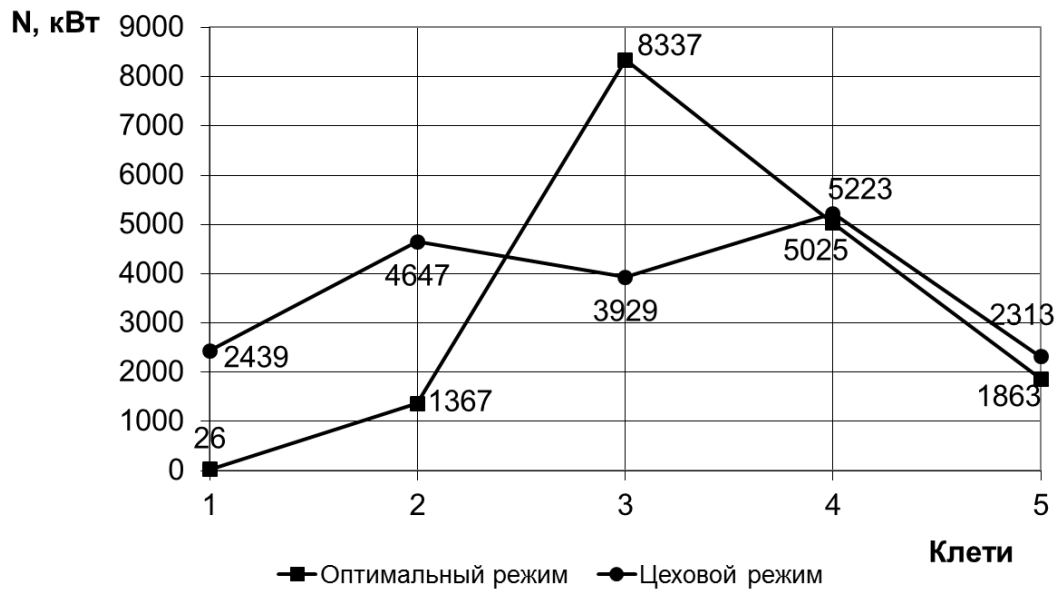


Рисунок 9.7 – Мощности прокатки по цеховым и оптимальным режимам. Профиль 1000×0,6 мм

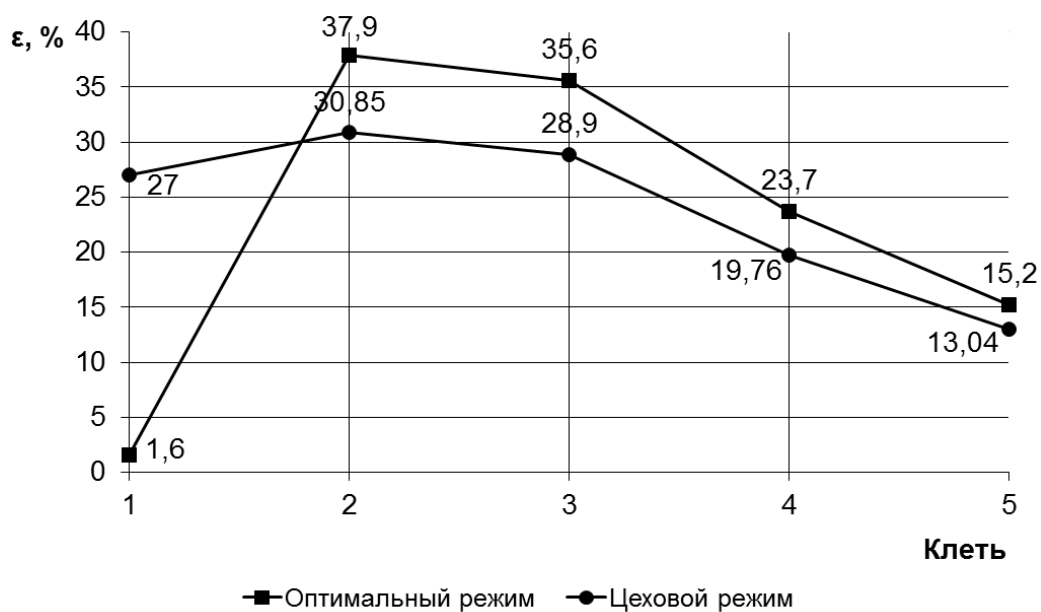


Рисунок 9.8 – Оптимальные и цеховые режимы обжатий. Профиль 1000×0,6 мм

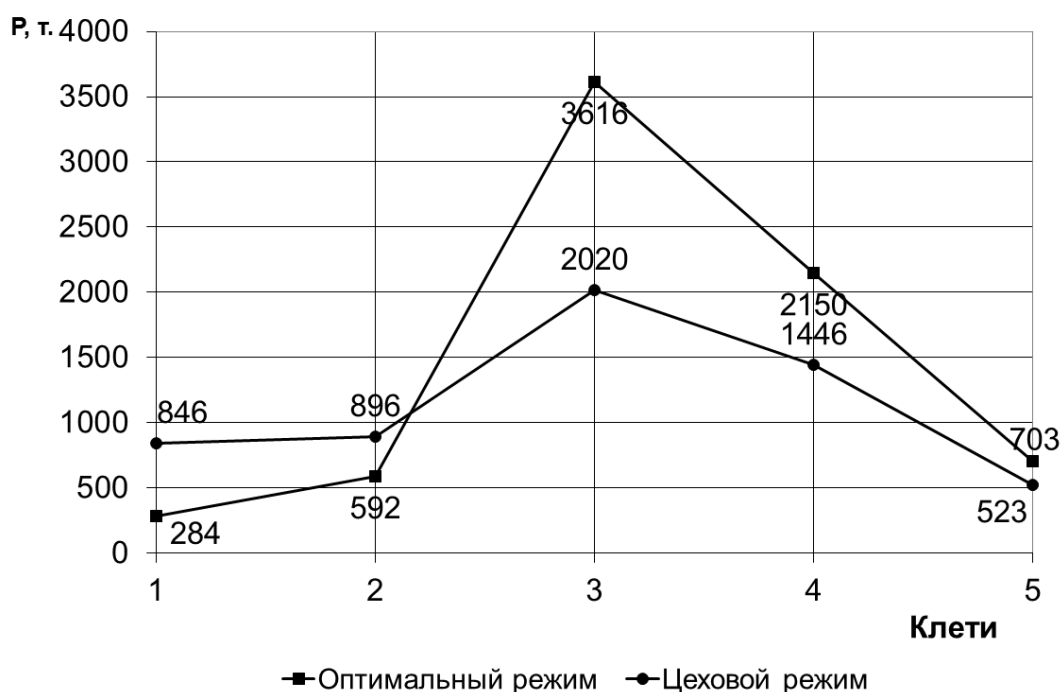


Рисунок 9.9 – Усилие прокатки. Профиль 1000×0,6 мм

Из графиков, приведенных на рисунках 9.2-9.9, следует, что оптимальные режимы прокатки по сравнению с цеховыми обеспечивают меньшее значение степени использования ресурса пластичности металла в среднем на 17,5%. При этом значения параметров прокатки (мощность, усилие), не выходят за пределы допустимых.

Это снижает вероятность порывов полос в межклетевых промежутках и возникновения аварийных ситуаций, увеличивает вероятность выкатывания поверхностных дефектов, способствует повышению производительности стана и улучшению качества готового продукта.

10 Исследование характеристик механических свойств жести, производимой на стане 1400

10.1 Назначение и характеристика жести

Жесть применяют для изготовления консервных банок, крышек к стеклянной таре и др. На станах холодной прокатки прокатывают жесть толщиной 0,1-0,5 мм и шириной до 1000 мм.

Различают жесть белую и черную. Наиболее распространенной является белая (луженая) жесть, полученная из черной жести путем нанесения на нее тонкого слоя олова. Металлическую основу для белой жести изготавливают из спокойной, полуспокойной и кипящей стали. Для уменьшения расхода олова жесть должна иметь определенное качество поверхности. В последнее время все больше производят жесть с покрытием лаком.

Характерным для современного производства жести является холодная прокатка ее в рулонах с применением непрерывных процессов травления, отжига, дрессировки, электролитического лужения.

Исходным материалом для холодной прокатки жести являются горячекатаные рулоны, поступающие с непрерывных полосовых станов горячей прокатки. К точности геометрических размеров полосы предъявляют высокие требования. Полоса должна иметь минимальную разнотолщинность по длине и особенно минимальную разнотолщинность переднего и заднего концов полосы рулона, для обеспечения хорошей прокатываемости сварных швов и максимального выхода годного [9].

10.2 Свойства жести и стандарты их регламентирующие

В странах СНГ для изготовления жести применяют стали марок 08кп, 08пс, 10кп с химическим составом по ГОСТ 1050, ГОСТ Р 52204-2004, ГОСТ 13345-85.

В Японии для лужения применяют специальные марки стали, которые в сочетании с покрытием обеспечивают максимальную коррозионную стойкость. Для хранения агрессивных жидкостей применяют сталь класса *L* (типы от Т-1 до Т-4) с химическим составом (%): *C* - 0,05-0,08; *Mn* - 0,30-0,40; *S* до 0,05; *P* до 0,015; *Si* до 0,010; *Cu* до 0,06; *Ni* до 0,04; *Cr* до 0,06; *Mo* до 0,05.

В Японии для хранения обычных (слабоагрессивных) жидкостей применяют сталь класса *MR* (тип от Т-1 до Т-2). Для изготовления более прочной тары используют сталь класса *MC* (типы Т-4, Т-5). Для производства жести с высокой твердостью используют сталь класса *MC* (Тип Т-6). В последнее время в Японии для изготовления луженой жести начали широко использовать сталь непрерывной разливки марки *RI*.

В США для изготовления жести применяют четыре типа сталей: *D*, *L*, *MC* и *MR*, различающиеся содержанием химических элементов и физико-механическими свойствами [31].

Жесть из стали *D* (раскисленной алюминием) применяют для изготовления цельноштампованной тары. Жесть из стали *L* (с низким содержанием остаточных элементов) применяют для изготовления тары с повышенной стойкостью против коррозии. Жесть из сталей *MC* и *MR* применяют для рядовой консервной тары и пивных банок. Кроме того, пивные банки изготавливают из азотированной стали (с минимальным содержанием азота–0,007%) типа *L-N*, *MC-N* и *MR-N*.

Для изготовления стальной основы белой жести предложено также использовать сталь следующего химсостава (в %): С – 0,05-0,12; Mn – 0,2-0,6; P ≤ 0,015, S ≤ 0,05; Si ≤ 0,01; Al ≤ 0,02; Cr ≤ 0,06; Cu ≤ 0,06; Mo ≤ 0,05; Ni ≤ 0,04. Стали с аналогичным химическим составом применяются для изготовления жести и в других странах. Характерный химсостав сталей, предназначенных для производства жести, приведен в таблице 10.1 [33].

Таблица 10.1 – Химический состав сталей, предназначенных для производства жести

Номера сталей	Содержание элементов, %						
	C	Mn	S	P	Si	Cu	N
1	0,085	0,35	0,020	0,015	0,01	0,06	0,005
2	0,070	0,30	0,025	0,020	0,01	0,03	0,001
3	0,060	0,25	0,020	0,010	0,01	0,05	0,005
4	0,100	0,50	0,025	0,013	0,008	0,02	0,010
5	0,090	0,40	0,020	0,010	0,01	0,05	0,005
6	0,090	0,40	0,025	0,012	0,008	0,05	0,003
7	0,090	0,35	0,025	0,012	0,009	0,03	0,005
8	0,090	0,40	0,020	0,013	0,01	0,02	0,003

Действие химических элементов на физико-химические свойства и коррозионную стойкость жести различные [32, 34, 35].

Содержание углерода в стали определяет ее пластические свойства. Содержание углерода в пределах от 0,03% до 0,1% несколько увеличивает предел текучести и твердость, но незначительно влияет на коррозионную стойкость.

Кремний в стали является упрочняющим элементом.

При выплавке сталей для белой жести всегда стремятся, как можно более снизить содержание в ней серы, оказывающей неблагоприятное влияние на пластические свойства, качество поверхности и коррозионную стойкость стали. Вредное влияние серы связано с образованием сульфидов, которые выделяясь в виде отдельной фазы, становятся катодными участками, на которых происходит выделение водорода [35].

Аналогичное влияние на белую жести оказывает и фосфор. Скорость коррозии увеличивается, когда содержание фосфора растет от малых его значений (0,014-0,048%) при низком содержании углерода (0,02%) и замедляется при дальнейшем увеличении содержания фосфора до 0,12% при содержании углерода 0,15%. Т.к. пластические характеристики жести при этом ухудшаются, стали с высоким содержанием фосфора можно использовать только в нейтральной, либо в слабо коррозионной среде.

Содержание меди в пределах до 0,2% не влияет на механические свойства жести.

Азот отрицательно влияет на коррозионную стойкость жести.

Большое влияние на качество поверхности, макроструктуру, механические свойства и коррозионную стойкость стали оказывает содержание в ней неметаллических включений, высокое количество которых в стали может привести к образованию разрывов металла при холодной прокатке, что влечет за собой порывы полосы, приводящие к авариям и значительным простоям стана.

От типа неметаллических включения (сульфиды железа и магния), их количества, расположения и формы зависит и коррозионная стойкость белой жести [35].

Таким образом, при производстве стали, предназначенной для изготовления белой жести, основными условиями являются получение металла с заданным химическим составом, минимальным количеством неметаллических включений, максимальной однородностью распределения химических элементов и включений по высоте и сечению катаного или литого слитка.

Качественные характеристики горячекатаного подката (качество поверхности, профиль и форма, продольная и поперечная разнотолщинность, микроструктура и механические свойства), который поступает на стан холодной прокатки, для производства стальной основы для жести, также влияет на качество и свойства белой жести [35].

Основные требования к подкату для холодной прокатки жести:

- минимальная продольная и поперечная разнотолщинность;
- высокие пластические свойства, однородные по длине и толщине полосы;
- отсутствие поверхностных дефектов («плена», «вкатанная окалина»).

«Вкатанная окалина» - наиболее часто встречаемый дефект поверхности подката, ухудшающий внешний вид луженой жести, препятствует адгезии оловянного покрытия. При вытравлении «вкатанной окислы», на местах ее залегания образуются раковины («рябизна»), которые, в свою очередь, повышают расход олова при лужении [36].

Стабильность процесса прокатки стальной основы для жести на высокоскоростных непрерывных станах зависит от пластических свойств подката, которые определяются не только химическим составом стали, но и структурой металла, которая определяется температурно-деформационным режимом горячей прокатки. Для обеспечения стабильности процесса

холодной прокатки и выкатываемости металла до нужной толщины твердость подката не должна превышать 55 ед. HRB [32].

Высокая пластичность и низкая твердость поката обеспечивается равномерной структурой с зерном феррита 7-8 баллов и мелкодисперсным цементитом. Наиболее равномерное зерно 7-8 баллов в подкате из стали 08кп формируется при температуре окончания прокатки выше 870⁰ и температуре смотки менее 680⁰С [37].

Высокие пластические свойства подката и равномерная структура с зерном 7-8 баллов обеспечивается при температуре конца прокатки 850-890⁰С и температур смотки 670-690⁰С. Смотка полос при температуре ниже 620⁰С снижает пластичность металла. Повышение температуры смотки до 660-675⁰С позволяет повысить пластичность металла за счет увеличения длительности выдержки металла при температурах 540-550⁰С, в пределах которых происходит естественный отжиг [32].

Большое влияние на механические свойства и твердость подката из стали 08пс оказывает влияние температура смотки. Увеличение температур смотки до 620-690⁰С снижает твердость подката HRB на 3-4 ед. (с 69 до 65-66 ед.) [38].

Температурный режим прокатки в значительной степени определяет величину продольной разнотолщинности подката, оказывающей влияние на качество и выход годного готовой жести [39]. В реальных условиях изменение температуры подката толщиной 2,0 мм на 40⁰С приводит к изменению толщины готовой полосы на 0,04 мм.

Стандартами всех стран устанавливаются определенные требования к белой жести. Регламентируются допускаемые отклонения размеров и формы листов, качество поверхности, механические свойства, твердость, толщина и масса покрытия.

Механические свойства черной и белой жести однократной и двукратной прокатки, ее пригодность в соответствии с ГОСТ Р 52204-2004 является твердость, измеренная по Супер-Роквеллу (таблица 10.2), пределы текучести, временное сопротивление, относительное удлинение (таблица 10.3) и глубина лунки по Эриксону (таблица 10.4).

Таблица 10.2 - Значения твердости белой жести

Степень твердости, класс прочности	Твердость по Супер-Роквеллу HR 30TA (алмазный столик*) при толщине жести, мм		
	< 0,21	0,21-0,28	>0,28
1	2	3	4
Жесть однократной прокатки			
T1	<53	<52	<51
T2	53±3	52±3	51±3
T3	56±3	55±3	54±3

Продолжение таблицы 10.2

1	2	3	4
T4	58±3	57±3	56±3
T5	60±3	59±3	58±3
T6	62±3	61±3	60±3
T7	66±3	65±3	64±3

* Значения норм твердости получены на опорном точечном столике с алмазной контактной поверхностью.

Таблица 10.3 - Значения предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения по ГОСТ Р 52204-2004

Степень твердости, класс прочности	Механические свойства		
	Предел текучести ** σ_T , Н/мм ²	Временное сопротивление ** σ_T , Н/мм ²	Относительное удлинение ** δ , не менее
Жесть однократной прокатки			
T1	230±40	325±40	25
T2	245±40	340±40	25
T3	260±40	360±40	25
T4	275±40	375±40	20
T5	290±40	390±40	15
T6	415±40	435±40	15
T7	435±40	460±40	10
Жесть двукратной прокатки			
ДП520	520±40	540±40	5
ДП550	550±40	570±40	1
ДП580	580±40	590±40	0,3
ДП620	620±40	625±40	0,2
ДП690	690±40	700±40	0,1

Таблица 10.4 – Глубина лунки по Эриксону

Номер жести	Толщина жести, мм	Глубина лунки по Эриксону, мм, не менее для степеней твердости		
		T1, T2	T3	T4
18	0,18	6,2	5,7	5,2
20	0,20	6,4	5,9	5,4
22	0,22	6,7	6,2	5,7
25	0,25	7,0	6,5	6,0
28	0,28	7,4	6,9	6,4
32	0,32	7,7	7,2	6,7
36	0,36	8,0	7,5	7,0

Для жести разного назначения глубина лунки на 1 мм меньше нормы, приведенных в таблице 10.4.

Жесть должна выдержать перегиб на 90° вокруг губок, радиусом 1,5 мм без появления признаков надлома и отслоения для марок не менее: девятикратного – ЧЖК (жесть черная (без покрытия) консервная); восьмикратного – ЭЖК (жесть белая электролитического лужения консервная), ГЖК (жесть белая горячего лужения консервная); семикратного – ЧЖР (жесть черная (без покрытия) разная); шестикратного – ЭЖР (жесть белая электролитического лужения разная), ГЖР (жесть белая горячего лужения разная).

Черную жесть и белую жесть электролитического лужения однократной прокатки выпускают со следующими видами отделки поверхности (ГОСТ Р 52204-2004):

- П – полированная поверхность для черной жести; для белой жести электролитического лужения - черная жесть с полированной поверхностью и оплавленным оловянным покрытием; шероховатость поверхности черной жести поперек направления прокатки - $Ra \leq 0,40$ мкм;

- Ш – шлифованная поверхность для черной жести; для белой жести электролитического лужения - черная жесть с шлифованной поверхностью и оплавленным оловянным покрытием; шероховатость поверхности черной жести поперек направления прокатки - $Ra \leq 0,63$ мкм;

- Н – насеченная поверхность для черной жести; для белой жести электролитического лужения - черная жесть с насеченной поверхностью и оплавленным оловянным покрытием; шероховатость поверхности черной жести не нормируется;

- М – (только для белой жести электролитического лужения) – черная жесть с поверхностью Ш или Н с неоплавленным оловянным покрытием.

Для черной и белой жести двукратной прокатки отделку поверхности осуществляют только по группе Ш.

10.3 Производство жести на АО «АрселорМиттал Темиртау»

В условиях АО «АрселорМиттал Темиртау» производится жесть следующего сортамента:

- жесть белая электролитического лужения толщиной 0,18-0,36 мм, шириной 712-1024 мм;

- жесть белая толщиной 0,15 мм, получаемую методом двойной прокатки;

- жесть черная толщиной 0,17-0,36 мм, шириной 820-1024 мм;

- листовая холоднокатаная сталь толщиной 0,35-0,63 мм, шириной 820-1000 мм (листы декапированной, кровельной и конструкционной стали, бронекапельная и упаковочная лента).

Жесть производят в цехе жести, в состав которого входит:

- прокатное отделение с шестиклетьевым станом 1400 бесконечной прокатки, двухклетевым дрессировочным станом 1400, двухклетевым прокатно-дрессировочным станом 1400;

- термическое отделение с двумя агрегатами электролитической очистки, колпаковыми печами рекристаллизационного отжига холоднокатаных рулонов, двумя агрегатами непрерывного отжига;

- отделение электролитического лужения с двумя агрегатами подготовки полосы и тремя агрегатами электролитического лужения (1200 - 1, 1200 - 2, 1400 - 1) с автономными агрегатами поперечной резки;

- адьюстаж с агрегатами поперечной резки листов и жести, тремя агрегатами поперечной резки жести, встроенными агрегатами упаковки, агрегатами сортировки холоднокатаных листов и жести - 2500, двумя агрегатами упаковки жести – 1200 - 1, 1200 - 2.

Подкатом для цеха жести служит горячекатаный металл в рулонах массой до 30 т.

Рулоны прокатываются на шестиклетьевом стане 1400 бесконечной прокатки, в линии которого установлена стыкосварочная машина и накопитель полосы с организованной петлей. Стан оснащен современными средствами автоматизации.

После прокатки рулоны массой до 30 т подвергаются очистке от технологической смазки на агрегатах электролитической очистки и передаются на рекристаллизационный отжиг в колпаковые печи или башенные печи агрегатов непрерывного отжига.

В целях улучшения планшетности и физико-механических характеристик металла отоженные рулоны подвергаются дрессировке на двухклетевым дрессировочном стане 1400 или прокатке па тончайшую жечь на прокатно-дрессировочном стане.

Рулоны черной жести, не предназначенные для лужения, передаются на адьюстаж для порезки на листы, сортировки, упаковки и отгрузки потребителям.

Рулоны черной жести, предназначенные для производства белой жести, передаются на агрегаты подготовки полосы, где после обрезки кромок, вырезки дефектов, обрезки передних и задних концов рулонов и сварки их на сварочной машине, формируются рулоны для агрегатов электролитического лужения.

На агрегатах электролитического лужения после предварительного обезжиривания, травления и неоднократной промывки полосы в соответствующих ваннах агрегатов осуществляется осаждение олова электролитическим способом на поверхность полосы в ваннах лужения с последующим оплавлением покрытия в индукционной печи и промасливанием поверхности в электростатическом поле.

На агрегатах лужения предусмотрено получение белой жести, имеющей различную толщину оловянного покрытия на разных сторонах полосы.

Смотанная в рулоны белая жечь передается на агрегаты поперечной резки. После сортировки и упаковки пачек жести готовая продукция отгружается потребителям.

Сортамент готовой продукции принят следующий:

- жечь электролитического лущения в листах или рулонах толщиной 0,18-0,36 мм, шириной 700-1200 мм по ГОСТ 1050-60;
- жечь хромированная в листах или рулонах толщиной 0,18-0,32 мм, шириной 700-1200 мм;
- холоднокатаные листы и рулоны декапированной, кровельной и конструкционной стали толщиной 0,25-0,6 мм, шириной 700-1200 мм;
- жечь с покрытием алюминием в листах и рулонах толщиной 0,18-0,3 мм, шириной 700-1200 мм;
- черная полированная жечь в листах и рулонах толщиной 0,18-0,36 мм, шириной 700-1200 мм;
- бронекапельная и упаковочная лента в рулонах толщиной 0,3-0,5 мм, шириной 20-60 мм.

Продукцией шестиклетьевого стана 1400 являются рулоны холоднокатаных полос, предназначенные для производства на последующих переделах; жести по ГОСТ 13345; ASTM A 625M и 624M, JIS G 3303; ТУ 14-1-4540-88; ТУ 14-1-4854-90; ТУ 14-1-5318-95 и тонколистового проката по ГОСТ16523-89, ГОСТ 9045-93, ТУ 14-11-262.

Металл поставляется по ГОСТ 13345; ТУ 14-11-262-89, ГОСТ 9045-93, ГОСТ, ГОСТ 24244; ASTM A 568M-95; ASTM A 366M-91; ASTM A 611A-89; JIS G3141-96; DIN 1623-83 часть 1 и 3, DIN 1623-86 часть 2, EN 10130-91, EN 10130-98.

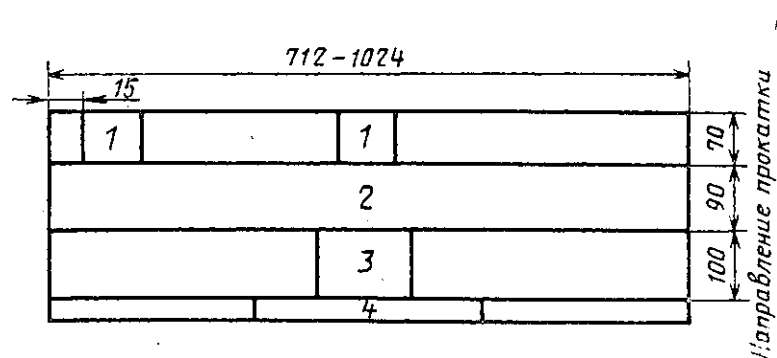
10.4 Методы определения характеристик и механических свойств жести

Для проверки размеров, качества поверхности жести отбирают 4% от массы или площади партии, но не менее четырех пачек или рулонов.

Для проверки механических свойств жести (твердости, глубины лунки по Эриксону) отбирают по два листа или по две полосы длиной 1 м из разных мест пачек или рулонов, отобранных в выборку для наружного осмотра [8, 40].

Отклонение от плоскостности измеряют мерительными инструментами соответствующей точности на листах или отрезках полосы, свободно уложенных на плоскую поверхность.

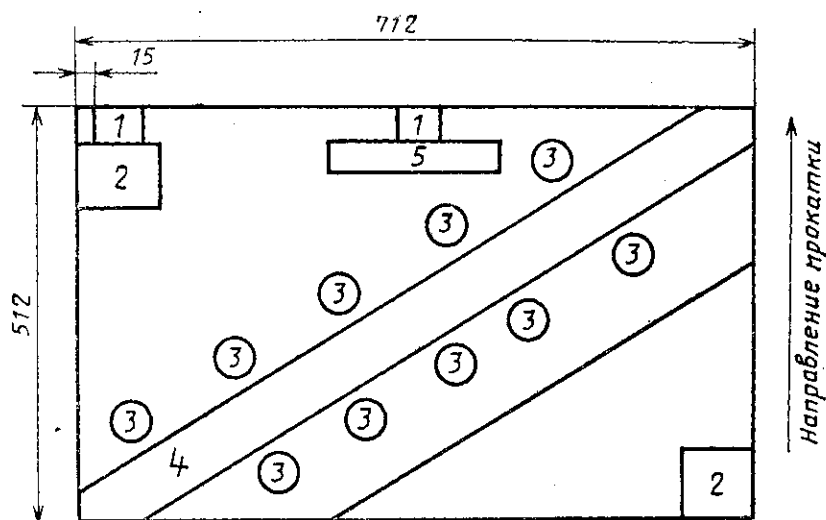
Определение механических свойств на соответствие механическим свойствам черной и белой жести однократной и двукратной прокатки проводят на образцах шириной 12,5 мм и начальной расчетной длиной 50 мм по ГОСТ 11701. Испытания образцов белой жести проводят после снятия покрытия. Образцы для испытаний вырезают из отрезков полосы или листа в соответствии с рисунками 10.1-10.2.



1 - образцы для измерения твердости (70×70 мм);
 2-полоса шириной 90 мм для испытания на выдавливание лунки по Эриксону;

3- образец для определения параметра шероховатости (100×100 мм; образец для испытания на перегиб (20×200 мм)

Рисунок 10.1 - Вырезка образцов из листов и полос черной жести



1 - образцы для измерения твердости (70×70 мм); 2 - образцы для измерения пористости покрытия (100×100 мм); 3 - заготовки шириной 130 мм для определения массы оловянного покрытия; 4 - полоса шириной 90 мм по диагонали листа для испытания на выдавливание лунки по Эриксону;

5 - заготовки для испытаний механических свойств (25×200 мм)

Рисунок 10.2 - Вырезка образцов из листов белой жести горячего лужения (ГОСТ Р 52204-2004)

Измерение твердости на соответствие механическим свойствам черной и белой жести однократной и двукратной прокатки проводят методом Супер-Роквелла по следующей методике (ГОСТ Р 52204-2004). Для подготовки образцов жести для испытания на твердость размером 70х70 мм вырезают из каждого листа или куска полосы по схеме, приведенным на рисунке 10.2. Образец должен быть плоским, с чистой сухой поверхностью, без царапин, выбоин, следов смазки, ржавчины или каких-либо покрытий.

Образцы жести для контроля твердости вырезают из каждого контрольного листа или отрезка по схемам, приведенным на рисунках 10.1 и 10.2.

Образец должен быть плоским, с чистой сухой поверхностью, без царапин, выбоин, следов смазки, ржавчины или каких-либо покрытий. Образцы с изогнутой поверхностью, следами деформации, а также с промасленной поверхностью к испытаниям на твердость не допускаются.

Оловянное покрытие снимают в подогретом до 50-70°C растворе состава гидроксида натрия и метанитробензойной кислоты, приготовленном на дистиллированной воде (ГОСТ 6709).

Свободные от покрытия пластинки промывают водой и протирают спиртом (ГОСТ 18300).

Измерение твердости проводят на приборе типа ТКС-1 или других аналогичных приборах, прошедших испытания и внесены в Государственный реестр средств измерений.

Измерение проводят по шкале 30Т, при нагрузке 294 Н шариком диаметром 1,588 мм на точечном опорном столике с алмазной контактной поверхностью.

Измерение твердости должно проводиться с соблюдением указаний, приведенных в инструкции по эксплуатации прибора ТКС-1.

Центры отпечатков следует располагать на расстоянии не менее 6 мм друг от друга или от кромки образца.

Оценку твердости проводят в условных единицах в зависимости от глубины проникновения шарика в испытуемое тело под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной - 29,4 Н и основной - 294 Н.

Отсчет результатов измерений твердости проводят по шкале индикатора автоматического снятия основной нагрузки (в приборе это фиксируется щелчком) при продолжающемся действии предварительной нагрузки.

Числом твердости считается показание стрелки на шкале индикатора в целых единицах. За результат измерения принимают среднее арифметическое значение не менее трех определений твердости, полученных на одном образце. Первые два измерения на образцах после смены наконечника или опорного точечного столика в расчет не принимают.

Общий разброс значений твердости на испытуемом образце не должен превышать 4 ед. Если разброс составляет более 4 ед., допускается повторное измерение.

Испытание на выдавливание по Эриксону проводят по ГОСТ 10510 на двух образцах для каждого вида жести.

Результатом испытаний являются среднее арифметическое значение определенной глубины шести лунок, расположенных по краям и в середине образца.

Испытание на перегиб проводят по ГОСТ 13813.

Величина значений механических свойств (твердость, предел текучести, предел прочности) белой жести является одним из важных показателей, регламентируемая потребителями.

Определение предела текучести белой жести осуществляется испытанием образцов на разрыв, для жести двойной прокатки предел

текучести определяют методом испытания угла пружинения и дальнейшим пересчетом по определенной формуле.

Теоретический угол пружинения определяют по формуле, приведенной в стандарте JIS3303-2002:

$$\frac{\theta}{180} = 3 \left[\frac{(\sigma_r) \cdot r}{E \cdot t} \right] - 4 \left[\frac{(\sigma_r) \cdot r}{E \cdot t} \right]^3, \quad (10.1)$$

где σ_r - предел текучести, (Н/мм²);

E – предел упругости, (Н/мм²);

θ - угол отскока (град.);

r – радиус кривизны при изгибе, (мм);

t – толщина образца, (мм).

Определение шероховатости поверхности проводят на одном образце по ГОСТ 2789.

10.5 Результаты испытаний механических свойств жести

10.5.1 Исследование твердости жести из стали марок *MR1* и *MR2*

Исследованию подвергли 2007,0 т жести из стали марок *UMR2* и *UMR3*, прокатного из непрерывнолитого металла на стане 1400.

Химический состав подката для жести представлен в таблице 10.5. В таблице 10.6 представлена твердость горячекатаного травленого подката для жести.

Таблица 10.5 – Химический состав горячекатаного подката для жести

Марка стали	Химический состав элементов, %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N ₂	Al	
UMR ₂	Min	0,04	0,17	0,01	0,012	0,009	0,01	0,03	0,04	0,004	0,023
	Max	0,06	0,30	0,02	0,023	0,018	0,02	0,06	0,08	0,005	0,058
	Ср.	0,053	0,218	0,012	0,018	0,013	0,011	0,036	0,058	0,004	0,038
UMR ₃	Min	0,05	0,16	0,01	0,012	0,009	0,01	0,03	0,04	0,004	0,026
	Max	0,07	0,30	0,015	0,023	0,023	0,03	0,08	0,09	0,008	0,048
	Ср.	0,055	0,227	0,011	0,018	0,014	0,011	0,037	0,058	0,005	0,039

Таблица 10.6 – Твердость горячекатаного травленого подката для жести

Марка стали	ЛПЦ-1					ЛПЦ-3, подкат жести			Среднее по полосе
	Тк.пр, °C	Тсм., °C	Твердость г/к полос, ед. HRB			Твердость х/к травленных полос, ед. HRB			
			кромка	середина	кромка	кромка	середина	кромка	
UMR2	870	720	68,5	61,5	66,0	66,1	61,4	65,5	64,3
UMR3	870	720	61,5	57,0	60,8	67,0	63,6	68,2	66,3

Из таблицы 10.6 следует, что среднее значение твердости для жести марки *MR2*, полученной из непрерывнолитого подката, равно 64,3 ед. HRB, а для стали марки *MR3* – 66.2 ед. HRB. Тогда как твердость подката из слиточного металла составляет 50 ÷ 60 ед. HRB. Выяснено, что подкат из непрерывнолитого металла имеет твердость, превышающую твердость подката из слиточного металла в среднем на 5 ед. HRB.

10.5.2 Исследование прочностных свойств белой жести

Механические свойства белой жести являются важнейшими показателями, регламентирующихся потребителями. Угол пружинения является показателем стандартов JIS3303-2002 и EN10202-2001, характеризующим прочностные свойства белой жести двойной прокатки.

С целью определения теоретического и фактического углов пружинения белой жести, полученной одинарной холодной прокаткой в условиях ЛПЦ-3, и получения уравнений регрессии, характеризующих зависимость величины угла пружинения от значений механических характеристик, были отобраны образцы пяти рулонов белой жести, прокатанной из горячекатаного непрерывнолитого подката стали марки 08кп. Полосы имели толщину 0,204÷0,230 мм и ширину 752÷907 мм.

Для материала образцов выбранных рулонов определили следующие характеристики: угол пружинения (γ , град); твердость (HRT 30A); предел прочности (σ_p , Н/мм²); предел текучести (σ_T , Н/мм²); длина после испытаний (l_2 , мм); относительное удлинение (λ).

Все перечисленные характеристики определены по действующим на предприятии стандартам ГОСТ-30415-96 и JIS3303-2002, EN10202-2001.

Механические характеристики определяли посередине и краю образцов полосы. Таким образом, каждый параметр был измерен 4 раза для материала образца каждого рулона. Результаты измерений посередине и краю полосы усреднили и использовали для получения уравнений линейной и множественной регрессии.

Теоретический угол пружинения рассчитывали по формуле (10.1).

Полученные результаты измерений и расчетов свели в базу данных, фрагмент которой приведен в таблице 10.7.

Все значения выборочных данных проверили на наличие грубых ошибок по критерию Стьюдента и на нормальность закона распределения по критерию χ^2 . По результатам проверки грубых ошибок выявлено не было, выборочные данные распределены в соответствие с нормальным законом [12].

Так как значения величины предела текучести использовались при определении теоретического угла пружинения, а значения величин длин образцов после испытаний - для определения относительного удлинения, величины значений предела текучести и длин после испытаний в построение зависимостей угла пружинения белой жести не включали.

Получили линейные уравнения регрессий, характеризующие зависимости теоретического и фактического углов пружинения от значений механических характеристик белой жести – твердости, предела прочности и относительного удлинения, парные зависимости которых представлены в графическом виде на рисунках 10.3-10.5.

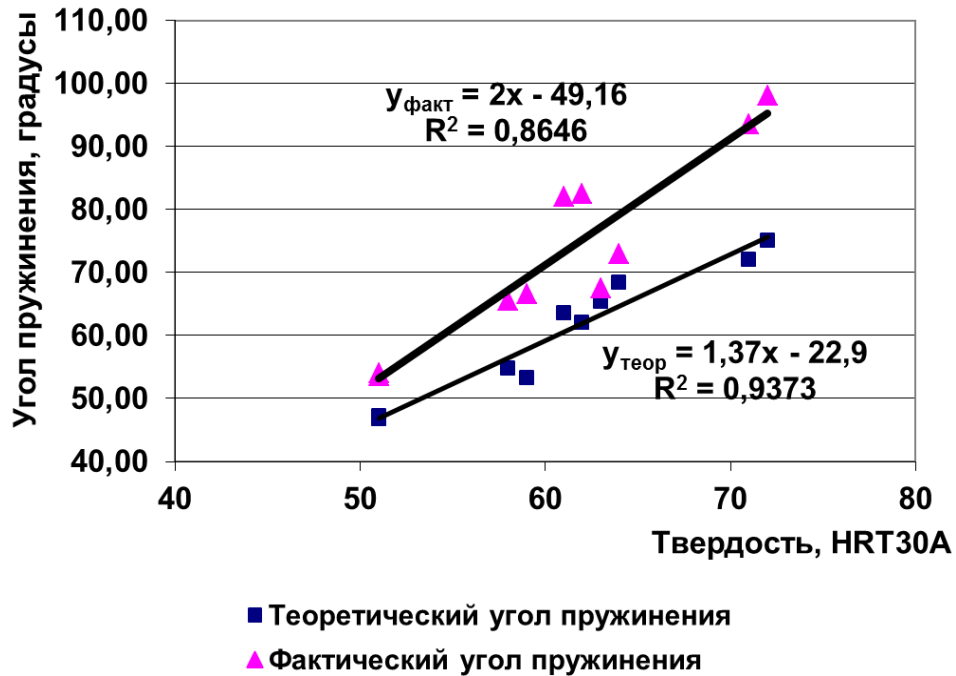


Рисунок 10.3 – Зависимость величины твердости белой жести от теоретического и фактического угла пружинения

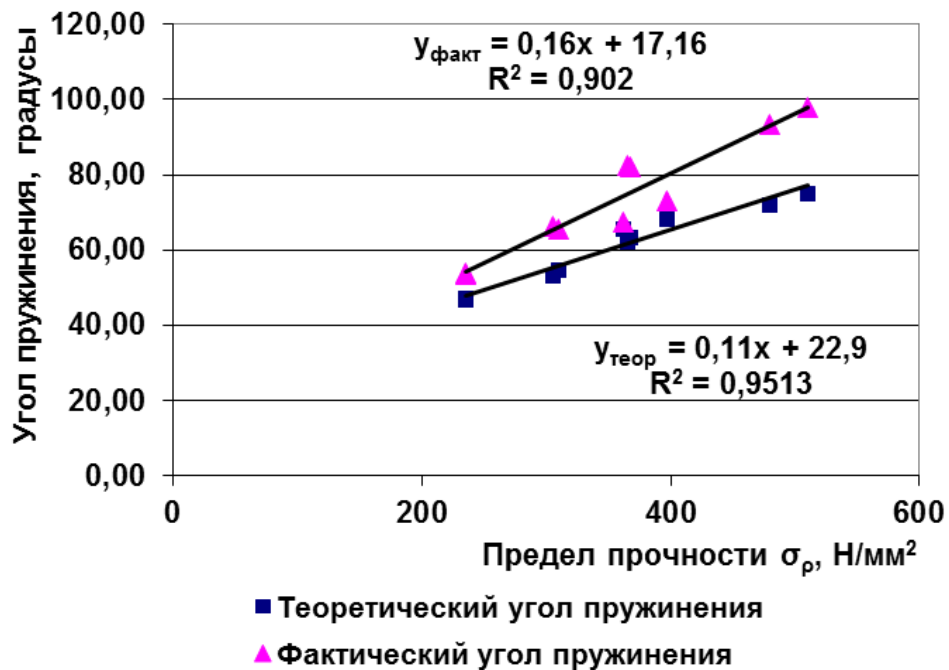


Рисунок 10.4 – Зависимость величины предела прочности белой жести от теоретического и фактического угла пружинения

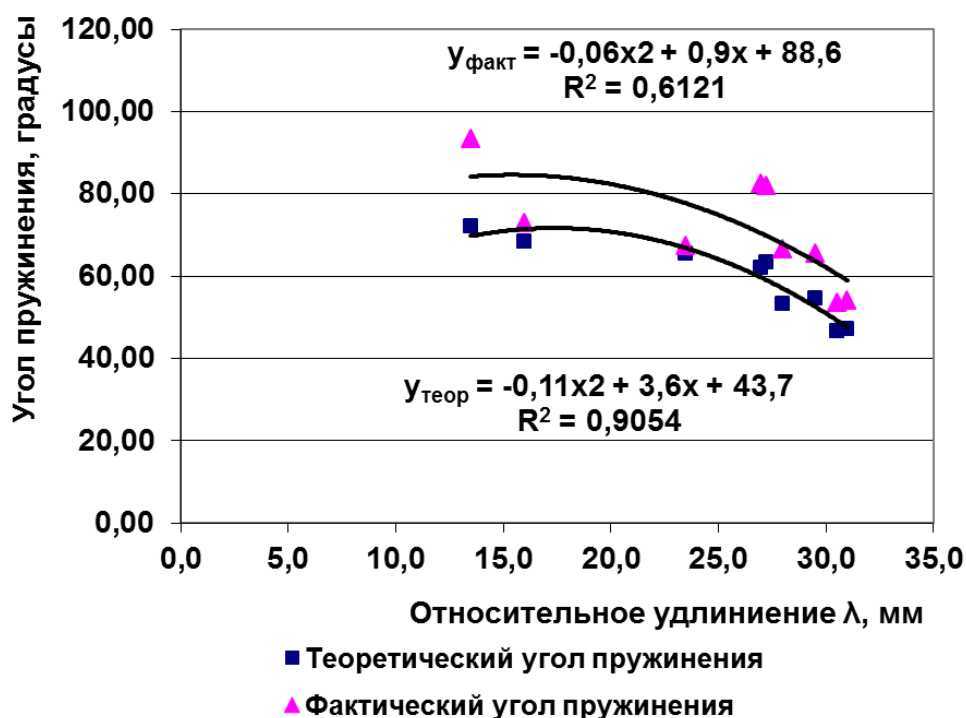


Рисунок 10.5 – Зависимость величины относительного удлинения белой жести от теоретического и фактического угла пружинения

Высокие коэффициенты детерминации R^2 характеризуют весьма тесную связь входящих в уравнения переменных.

Из приведенных на рисунках 10.3-10.5 уравнений, видно несоответствие значений угла пружинения, полученных экспериментальным и расчетным путем. Это объясняется тем, что оценка механических свойств материала путем определения угла пружинения осуществляется только для жести двойной прокатки (по стандарту JIS3303-2002).

Используя результаты измерений, построили уравнение множественной линейной регрессии, характеризующее зависимость величины фактического угла пружинения от значений механических характеристик белой жести. Уравнение регрессии включает в себя следующие факторы: X_1 (твердость, HRT30A); X_2 (предел прочности σ_p , Н/мм²); X_3 (относительное удлинение λ). Параметром Y выбран фактический угол пружинения $\gamma, ^\circ$.

Условные обозначения входящих в уравнения регрессий факторов приведены в таблице 10.6.

Таблица 10.6 – Условные обозначения факторов

Кодированное обозначение	Натуральное обозначение
Y	фактический угол пружинения $\gamma, ^\circ$
X_1	твердость, HRT 30A
X_2	предел прочности σ_p , Н/мм ²
X_3	относительное удлинение λ

Построили матрицу корреляции, коэффициенты которой проверили на значимость по критерию Стьюдента.

Параметры уравнения множественной регрессии рассчитали методом наименьших квадратов. Получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии: $a_0 = 8,13$; $a_1 = -1,75$ и $a_0 = 0,39$; $a_1 = 1,35$.

Полученное уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$y = 8,13 - 1,75X_1 + 0,39X_2 + 1,35X_3. \quad (10.2)$$

Коэффициенты уравнения проверили на значимость при помощи критерия Стьюдента. Все входящие в уравнение коэффициенты значимы [16].

Проверка на адекватность модели проводилась при помощи F-критерия Фишера. Проверка основана на сравнении дисперсии регрессии $S_y^2 = 452,76$ с остаточной дисперсией $S_{y\text{ост}}^2 = 12,62$ по формуле:

$$F = S_{y\text{ост}}^2 / S_y^2 < F_{(v_1; v_2; 5\%)}^{\text{табл}}, \quad (10.3)$$

где $v_1 = n - 1 = 8$;

$v_2 = n - p - 1 = 5$;

p – количество влияющих факторов, входящих в уравнение.

Таким образом, при $F_{(8;5;5\%)}^{\text{ТАБЛ}} = 4,82$ уравнение адекватно, т.к. выполняется условие:

$$F = 0,03 < F_{(8;5;5\%)}^{\text{ТАБЛ}} = 4,82.$$

Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 составил $0,9556$, что говорит о тесной связи параметров полученной модели.

Однако угол пружинения является показателем прочностных свойств белой жести двойной прокатки, поэтому проведенная оценка свойств белой жести одинарной прокатки не может быть использована в качестве аттестационной для этого вида продукции. Этим можно объяснить и несоответствие значений угла пружинения, полученных расчетным и экспериментальным способами.

Таблица 10.7 – Свойства белой жести

Маркировка образцов	Место отбора	Фактический угол пружинения γ , °			Теоретический угол пружинения γ , °			Твердость НРТ 30А	Предел прочности, $\sigma_{p, 2}$ Н/мм ²			Предел текучести, $\sigma_{T, 2}$ Н/мм ²			Относительное удлинение, λ			Длина образца после испытания, l_2 , мм		
		1	2	ср.	1	2	ср.		1	2	ср.	1	2	ср.	1	2	ср.	1	2	ср.
Пл. 272556 3-1542 0,23x880x861 Т2,5(В) 2,8/2,8	край	66	67	66,5	53,5	53,0	53,25	59	300	310	305	360	360	360	30	26	28,0	65,1	62,8	63,95
	середина	66	65	65,5	54,9	54,6	54,75	58	310	310	310	370	370	370	33	26	29,5	66,0	62,8	64,40
Пл. 272556 1-1706 0,22x800x950 А2 2,8/5,6	край	53	55	54,0	47,3	47,1	47,20	51	230	240	235	325	325	325	30	32	31,0	65,0	65,8	65,40
	середина	52	55	53,5	46,5	47,1	46,80	51	230	240	235	325	325	325	30	31	30,5	65,2	65,5	65,35
Пл. 272556 3-1549 0,23x907x750 В 2,8/2,8	край	93	94	93,5	71,7	72,4	72,05	71	480	480	480	520	525	523	13	14	13,5	56,4	56,9	56,65
	середина	96	100	98,0	75,9	74,3	75,10	72	530	490	510	550	535	543	-	-	-	-	-	-
Пл. 272556 2-1120 0,20x837x768 В 2,8/2,8	край	79	86	82,5	62,1	62,1	62,10	62	370	360	365	395	395	395	-	27	27,0	-	63,6	63,60
	середина	80	84	82,0	63,1	63,9	63,50	61	375	360	368	400	405	403	30	25	27,3	64,8	62,3	63,55
Пл. 272556 3-1576 0,20x752x630 Т4 2,8/2,8	край	69	66	67,5	65,4	65,4	65,40	63	360	365	363	415	415	415	20	27	23,5	60,0	63,3	61,65
	середина	71	75	73,0	67,8	69,0	68,40	64	395	400	398	420	430	425	18	14	16,0	59,0	57,0	58,00

10.5.3 Статистическая оценка показателей качества жести из стали марки 08кп

Существенное влияние на механические свойства оказывает ее химический состав. Качество жести, прокатанной в условиях АО «АрселорМиттал Темиртау», регламентируется соответствующими стандартами и характеризуется рядом единичных показателей, важнейшими из которых являются содержание химических элементов и механические свойства.

С целью оценки качества черной жести провели статистическое исследование содержания химических элементов и механических свойств на предмет соответствия их стандартам. Исследованию подвергли более 70 рулонов холоднокатаной жести, прокатанной из горячекатаного непрерывнолитого подката стали марки 08кп, толщиной 0,19-0,23 мм, 0,25-0,26 мм и 0,28-0,32 мм.

Отбор проб, подготовку образцов, определение механических свойств холоднокатаной жести, произведенной на шестиклетевом стане 1400, осуществляли по стандартизированным методикам [14, 15]. В качестве исследуемых величин использовали твердость HSB, глубину сферической вытяжки по Эриксону. В таблицах 10.8-10.10 приведены фрагменты выборок измеренных механических свойств жести указанных толщин.

Выборочные данные по всем толщинам проверили на наличие грубых ошибок по критерию Стьюдента. Для этого сравнили расчетные значения критерия τ с табличным значением $t_{p, N-2}$ [16]:

$$\tau_{(p, N-2)} = \frac{t_{(p, N-2)} \sqrt{N-1}}{\sqrt{N-2 + [t_{(p, N-2)}]^2}}. \quad (10.4)$$

Для выделения аномального значения использовали максимальное относительное отклонение:

$$\tau = \frac{|r_i - r_{cp}|}{S} \leq \tau_{(p, N)}. \quad (10.5)$$

Результаты расчетов, используемые для проверки на наличие грубых ошибок, приведены в таблице 10.11-10.13. Из таблиц 10.11- 10.13 следует, что во всех выборках грубых ошибок нет. Далее для каждой выборки рассчитали: среднее арифметическое, минимальное значение, максимальное значение, медиану, моду, стандартное отклонение (СКО), дисперсию, эксцесс, асимметричность, (таблицы 10.14-10.16).

Гипотезу нормальности распределения для сравнительно широкого класса выборок проверяли, используя размах варьирования [22]. Результаты расчета величин, необходимых для проверки гипотезы о нормальности распределения выборочных данных, приведены в таблице 10.10-10.12. Из таблиц 10.10-10.12 видно, что условие нормальности распределения всех элементов выборки выполняется, следовательно, гипотеза нормальности исследуемых распределений может быть принята.

Таблица 10.8 - Фрагмент выборки механических свойств жести толщиной 0,19-0,23 мм

Номинальная толщина жести, мм	Фактическая толщина	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм		
		Замеры						край	середина	край
		край	середина	край	край	середина	край			
0,22	0,22	58	58	58	58	58	58	7,8	7,9	7,6
0,2	0,2	56	56	55	58	58	58	8	7,8	7,7
0,22	0,23	62	61	61	62	62	62	7,8	7,7	7,5
0,2	0,2	60	60	60	62	61	61	7,3	7,4	7,1
0,21	0,21	57	58	57	57	58	57	7,8	8,3	8,2
0,2	0,2	60	60	61	60	61	61	7,2	7,1	7,1
0,2	0,21	56	56	57	55	56	56	7,8	8,3	8,1
0,2	0,21	57	57	58	57	57	57	8,3	8,3	8
0,22	0,22	56	56	56	57	56	57	8,7	8,4	8
0,22	0,22	58	57	58	58	58	57	8,7	8,4	8
0,22	0,22	62	63	62	61	62	62	7,5	7,3	7,2
0,23	0,23	56	56	56	56	56	56	8,8	8,8	8,8
0,2	0,2	56	57	57	59	59	58	7,6	7,6	7,6
0,22	0,21	59	59	59	59	59	59	7,7	7,9	7,3
0,2	0,21	55	55	55	57	57	56	8,2	7,7	7,8
0,2	0,21	55	56	56	56	56	56	8	7,9	8,2
0,2	0,21	58	57	57	59	60	60	7,6	7,8	7,5
0,2	0,2	56	57	56	58	57	58	7,6	7,5	7,8
0,21	0,21	61	60	60	61	62	60	7,3	7,7	7,2
0,2	0,2	62	60	60	59	61	60	6,7	6,8	6,6
0,2	0,2	60	60	59	62	62	61	7,2	7,4	6,9
0,23	0,23	56	57	58	57	57	57	8,8	8,8	8,8
0,2	0,2	63	62	62	64	63	63	7,6	7,4	7,5
0,22	0,22	57	58	58	58	59	59	7,4	7,4	7,5

Таблица 10.9 - Фрагмент выборки механических свойств жести толщиной 0,23-0,25 мм

Номинальная толщина жести, мм	Факти- ческая толщина, мм	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм		
		Замеры						край	середина	край
		край	середина	край	край	середина	край			
0,25	0,25	59	58	59	59	59	59	8,4	8,1	8,5
0,25	0,25	61	61	61	62	62	61	7,9	7,9	7,7
0,26	0,26	56	57	57	58	58	58	8,1	8,5	8,6
0,26	0,26	58	58	57	57	57	57	8,1	8,5	8,6
0,26	0,26	57	58	58	58	59	58	7,6	7,9	8,2
0,26	0,26	59	59	60	59	59	59	8,4	8,7	8,7
0,26	0,26	59	59	59	59	59	59	8,6	8,7	8,5
0,25	0,25	59	59	59	59	59	59	8,3	8,4	8,4

Таблица 10.10 - Фрагмент выборки механических свойств жести толщиной 0,28-0,32 мм

Номи- нальная толщина жести, мм	Факти- ческая толщина, мм	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм		
		Замеры								
		край	середина	край	край	середина	край	край	середина	край
0,28	0,28	57	57	58	58	58	58	8,9	9,0	8,9
0,28	0,29	58	58	59	58	58	57	8,9	9,0	8,9
0,28	0,28	58	58	58	57	58	58	9,0	8,7	8,9
0,28	0,28	57	57	57	57	57	57	8,9	9,0	8,8
0,28	0,28	55	56	56	56	56	56	8,9	9,0	8,9
0,28	0,29	57	57	58	57	58	59	8,8	8,7	8,8
0,28	0,27	59	58	59	59	59	59	9,0	9,0	8,8
0,28	0,28	57	57	57	57	57	57	9,0	9,0	8,9
0,28	0,27	57	58	58	58	59	60	8,3	8,8	8,9
0,28	0,28	56	56	57	56	57	56	9,0	8,7	8,9
0,28	0,28	57	57	57	58	58	58	9,0	8,9	9,0
0,28	0,28	57	57	57	56	56	57	8,7	8,5	8,8
0,28	0,28	55	57	56	57	58	57	8,8	9,1	9,1
0,28	0,28	57	57	58	59	60	59	8,4	8,1	8,2
0,28	0,28	57	56	56	59	58	59	8,2	8,1	8,5
0,28	0,28	57	57	58	58	59	58	8,8	9,1	9,1
0,28	0,28	58	58	59	58	58	58	9,1	8,8	9,0
0,28	0,28	58	58	59	59	58	58	8,2	8,1	8,5
0,28	0,28	59	59	60	59	59	60	8,4	8,1	8,2
0,28	0,28	59	60	60	59	60	60	8,4	8,1	8,2
0,28	0,28	59	60	60	60	60	60	8,8	9,1	9,1
0,28	0,28	60	59	59	60	60	60	8,8	9,1	9,1

Таблица 10.11 – Отсев грубых погрешностей выборки показателей твердости, глубины лунки и химических элементов, проверка гипотезы нормальности закона распределения для жести толщиной 0,19-0,23 мм

Параметр	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм			Содержание химических элементов, %									
	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	C	MN	SI	P	S	CR	NI	CU	N	AL
<i>Отсев грубых погрешностей</i>																			
xmax-хср	4,794	5,683	5,603	5,286	4,206	4,222	0,913	0,883	1,006	0,0222	0,3530	0,0694	0,0148	0,0083	0,0133	0,0195	0,0160	0,0014	0,0137
t(5%,61)	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999
t(0,1%,61)	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225
τ'(5%,61)	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952	1,952
τ	0,868	1,192	1,154	1,159	0,924	0,988	2,924	2,893	2,947	2,722	2,624	2,199	2,550	2,816	2,122	1,981	2,028	2,600	1,526
τ'(0,1%,61)	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
проверка на отсев грубых погрешностей	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает
<i>Проверка гипотезы нормальности закона распределения по размаху варьирования R</i>																			
нижний предел R/S, (при n=63, p=0,1)	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12
R/S	4,135	4,988	4,867	4,543	4,435	4,358	4,998	5,083	5,034	4,453	4,999	4,542	4,907	5,235	5,125	5,122	5,333	4,343	4,453
верхний предел R/S, (при n=63, p=0,1)	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32
подтверждение гипотезы	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв

Таблица 10.12– Отсев грубых погрешностей выборки показателей твердости, глубины лунки и химических элементов, проверка гипотезы нормальности закона распределения для жести толщиной 0,25-0,26 мм

Параметр	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм			Содержание химических элементов, %									
	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	C	MN	SI	P	S	CR	NI	CU	N	AL
<i>Отсев грубых погрешностей</i>																			
х _{макс-х_{ср}}	2,5	2,375	2,25	3,125	3	2,25	0,425	0,3625	0,3	0,009	0,0525	0,00087	0,0031	0,002	0,00625	0,0075	0,01375	0,0014	0,0034
t(5%,6)	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943
t(0,1%,6)	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208
t'(5%,6)	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644
τ	1,094	1,684	1,167	1,471	1,500	1,658	2,148	2,343	2,125	1,873	1,777	1,904	1,784	1,574	2,334	1,528	2,391	1,724	1,863
τ'(0,1%,6)	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394
проверка на отсев грубых погрешностей	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает
<i>Проверка гипотезы нормальности закона распределения по размаху варьирования R</i>																			
нижний предел R/S, (при n=8, p=0,1)	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59
R/S	2,683	2,835	2,877	2,862	2,600	2,947	2,907	2,740	2,972	2,595	3,118	2,825	3,132	3,242	2,721	2,992	2,678	3,267	3,111
верхний предел R/S, (при n=8, p=0,1)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Подтверждение гипотезы нормальности распределения	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв

Таблица 10.13 – Отсев грубых погрешностей выборки показателей твердости, глубины лунки и химических элементов, проверка гипотезы нормальности закона распределения для жести толщиной 0,28-0,32 мм

Параметр	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм			Содержание химических элементов, %									
	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	C	MN	SI	P	S	CR	NI	CU	N	AL
<i>Отсев грубых погрешностей</i>																			
х _{макс} -х _{ср}	2,5	2,375	2,25	3,125	3	2,25	0,425	0,3625	0,3	0,009	0,0525	0,00087	0,0031	0,002	0,00625	0,0075	0,01375	0,0014	0,0034
t(5%,6)	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943
t(0,1%,6)	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208
t'(5%,6)	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644
τ	1,094	1,684	1,167	1,471	1,500	1,658	2,148	2,343	2,125	1,873	1,777	1,904	1,784	1,574	2,334	1,528	2,391	1,724	1,863
τ'(0,1%,6)	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394
проверка на отсев грубых погрешностей	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает	не превышает
<i>Проверка гипотезы нормальности закона распределения по размаху варьирования R</i>																			
нижний предел R/S, (при n=8, p=0,1)	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59
R/S	2,683	2,835	2,877	2,862	2,600	2,947	2,907	2,740	2,972	2,595	3,118	2,825	3,132	3,242	2,721	2,992	2,678	3,267	3,111
верхний предел R/S, (при n=8, p=0,1)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Подтверждение гипотезы нормальности распределения	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв	подтв

Таблица 10.14 – Статистические показатели распределения твердости, глубины лунки, химических элементов жести толщиной 0,19-0,23 мм

Параметр	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм			Содержание химических элементов, %									
	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	C	MN	SI	P	S	CR	NI	CU	N	AL
Среднее	58,206	58,317	58,397	58,714	58,794	58,778	7,887	7,917	7,794	0,058	0,267	0,015	0,017	0,017	0,017	0,040	0,064	0,005	0,041
Стандартная ошибка	0,296	0,275	0,278	0,269	0,269	0,260	0,0609	0,0535	0,0562	0,0011	0,0094	0,0019	0,0006	0,0004	0,0006	0,0012	0,0016	0,0001	0,0006
Медиана	58	58	58	58	58	58	7,8	8	7,8	0,06	0,26	0,011	0,016	0,017	0,02	0,04	0,06	0,004	0,041
Мода	56	57	58	58	58	58	8	8,3	7,6	0,05	0,27	0,01	0,012	0,017	0,02	0,04	0,06	0,004	0,041
Стандартное отклонение	2,350	2,184	2,204	2,136	2,134	2,067	0,483	0,425	0,446	0,0091	0,0748	0,0147	0,0051	0,0030	0,0051	0,0099	0,0125	0,00074	0,0051
Дисперсия выборки	5,521	4,769	4,856	4,562	4,554	4,272	0,233	0,180	0,199	0,000082	0,0056	0,00022	0,000026	0,000009	0,000026	0,00010	0,00016	0,0000005	0,000026
Экссесс	-0,798	-0,177	-0,200	-0,402	-0,744	-0,689	-0,459	-0,350	-0,075	-0,2735	1,5208	1,7960	-0,2418	-0,1497	-1,0164	-0,3771	-0,7591	-0,5202	-0,4104
Асимметричность	0,468	0,500	0,362	0,520	0,433	0,534	0,019	-0,315	-0,014	0,8651	3,6677	4,3613	0,7120	0,3723	-0,3388	0,5190	-0,3444	0,9318	0,4988
Интервал	8	10	10	9	8	7	2,1	2	2,2	0,03	0,41	0,074	0,022	0,015	0,02	0,04	0,04	0,002	0,022
Минимум	55	54	54	55	55	56	6,7	6,8	6,6	0,05	0,21	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,004	0,033
Максимум	63	64	64	64	63	63	8,8	8,8	8,8	0,08	0,62	0,084	0,032	0,025	0,03	0,06	0,08	0,006	0,055
Сумма	3667	3674	3679	3699	3704	3703	496,9	498,8	491	3,64	16,82	0,917	1,082	1,051	1,05	2,55	4,03	0,287	2,602
Счет	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Уровень надежности (95,0%)	0,592	0,550	0,555	0,538	0,537	0,521	0,122	0,107	0,112	0,0023	0,0188	0,0037	0,0013	0,00077	0,0013	0,0025	0,0032	0,00019	0,0013
Коэффициент вариации, %	9,486	8,177	8,316	7,770	7,745	7,269	2,959	2,280	2,557	0,142	2,096	1,491	0,153	0,056	0,155	0,243	0,245	0,012	0,062

Таблица 10.15 – Статистические показатели распределения твердости, глубины лунки и химических элементов жести толщиной 0,25-0,26 мм

Параметр	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм			Содержание химических элементов, %									
	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	C	MN	SI	P	S	CR	NI	CU	N	AL
Среднее	58,5	58,625	58,75	58,875	59	58,75	8,175	8,338	8,4	0,061	0,248	0,010	0,014	0,014	0,014	0,033	0,056	0,0046	0,039
Стандартная ошибка	0,535	0,420	0,491	0,515	0,5	0,412	0,113	0,116	0,113	0,0013	0,0092	0,00013	0,00074	0,00071	0,0018	0,0025	0,0038	0,00026	0,00089
Медиана	59	58,5	59	59	59	59	8,2	8,45	8,5	0,06	0,24	0,01	0,014	0,0145	0,01	0,03	0,06	0,0045	0,038
Мода	59	58	59	59	59	59	8,4	7,9	8,5	0,06	0,24	0,01	0,014	0,015	0,01	0,03	0,06	0,004	0,037
Стандартное отклонение	1,512	1,188	1,389	1,458	1,414	1,165	0,320	0,329	0,321	0,0035	0,026	0,0004	0,0021	0,0020	0,0052	0,0071	0,0106	0,0007	0,0025
Дисперсия выборки	2,286	1,411	1,929	2,125	2	1,357	0,102	0,108	0,103	0,000013	0,00068	0,00000013	0,0000044	0,0000040	0,000027	0,000050	0,00011	0,00000055	0,000006
Экссесс	0,580	1,872	-0,553	3,368	3,5	1,737	0,131	-1,620	3,306	8	1,652	8	1,1343	-0,7	-2,240	-0,229	-0,127	-0,152	-1,523
Асимметричность	-0,165	0,970	0,160	1,389	1,212	0,633	-0,643	-0,410	-1,767	2,828	1,140	2,828	-0,399	-0,857	0,644	-0,404	-0,913	0,824	0,058
Интервал	5	4	4	5	5	4	1	0,8	1	0,01	0,08	0,001	0,007	0,005	0,01	0,02	0,03	0,002	0,007
Минимум	56	57	57	57	57	57	7,6	7,9	7,7	0,06	0,22	0,01	0,01	0,011	0,01	0,02	0,04	0,004	0,035
Максимум	61	61	61	62	62	61	8,6	8,7	8,7	0,07	0,3	0,011	0,017	0,016	0,02	0,04	0,07	0,006	0,042
Сумма	468	469	470	471	472	470	65,4	66,7	67,2	0,49	1,98	0,081	0,111	0,112	0,11	0,26	0,45	0,037	0,309
Счет	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Уровень надежности (95,0%)	1,264	0,993	1,161	1,219	1,182	0,974	0,267	0,275	0,268	0,003	0,022	0,000	0,002	0,002	0,004	0,006	0,009	0,001	0,002
Коэффициент вариации, %	3,907	2,406	3,283	3,609	3,390	2,310	1,249	1,300	1,224	0,020	0,274	0,001	0,032	0,029	0,195	0,154	0,200	0,012	0,016

Таблица 10.16– Статистические показатели распределения твердости, глубины лунки и химических элементов жести толщиной 0,28-0,32 мм

Параметр	Твердость, HR30TA						Глубина сферической лунки, мм			Содержание химических элементов, %									
	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	Край	Середина	Край	C	MN	SI	P	S	CR	NI	CU	N	AL
Среднее	57,778	57,917	58,194	58,250	58,417	58,278	8,653	8,622	8,692	0,061	0,266	0,011	0,019	0,017	0,022	0,041	0,067	0,0046	0,037
Стандартная ошибка	0,239	0,240	0,251	0,256	0,247	0,244	0,050	0,064	0,052	0,00096	0,0052	0,00025	0,0012	0,00075	0,0021	0,0018	0,0018	0,00015	0,0012
Медиана	58	58	58	58	58	58	8,8	8,7	8,8	0,060	0,27	0,01	0,015	0,018	0,02	0,04	0,07	0,004	0,035
Мода	57	57	58	58	58	58	8,8	8,1	8,9	0,060	0,28	0,01	0,014	0,012	0,02	0,04	0,08	0,004	0,035
Стандартное отклонение	1,436	1,442	1,508	1,538	1,481	1,466	0,297	0,382	0,312	0,0057	0,0314	0,0015	0,0070	0,0045	0,0123	0,0111	0,0110	0,0009	0,0072
Дисперсия выборки	2,063	2,079	2,275	2,364	2,193	2,149	0,088	0,146	0,097	0,000033	0,00099	0,0000022	0,000048	0,000020	0,00015	0,00012	0,00012	0,00000082	0,000052
Эксцесс	-0,095	0,454	0,339	0,544	0,994	0,649	-1,082	-1,549	-1,374	4,741	3,179	7,892	-1,621	-0,736	6,471	2,404	-1,312	-1,206	0,052
Асимметричность	-0,015	-0,089	-0,509	-0,296	-0,555	-0,513	-0,417	-0,155	-0,229	-0,941	-1,604	2,637	0,458	0,230	2,587	1,306	-0,107	0,880	0,816
Интервал	6	7	7	7	7	7	1,1	1	0,9	0,03	0,15	0,007	0,019	0,017	0,05	0,05	0,03	0,002	0,027
Минимум	55	54	54	54	54	54	8	8,1	8,2	0,04	0,18	0,01	0,011	0,011	0,01	0,02	0,05	0,004	0,028
Максимум	61	61	61	61	61	61	9,1	9,1	9,1	0,07	0,33	0,017	0,03	0,028	0,06	0,07	0,08	0,006	0,055
Сумма	2080	2085	2095	2097	2103	2098	311,5	310,4	312,9	2,2	9,57	0,391	0,675	0,608	0,78	1,47	2,4	0,166	1,324
Счет	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Уровень надежности (95,0%)	0,486	0,488	0,510	0,520	0,501	0,496	0,101	0,129	0,106	0,0019	0,0106	0,0005	0,0024	0,0015	0,0042	0,0037	0,0037	0,0003	0,0024
Коэффициент вариации, %	3,571	3,589	3,910	4,059	3,754	3,688	1,020	1,691	1,120	0,054	0,371	0,021	0,259	0,118	0,699	0,299	0,180	0,018	0,142

10.6 Квалиметрический анализ качества черной жести

В основу квалиметрического подхода к исследованию качества черной жести положили принцип рассмотрения качества продукции как некоторой иерархической совокупности свойств, причем таких свойств, которые представляют интерес для потребителей данного продукта труда. При моделировании качества продукции в виде иерархической структуры свойств приняли, что качество, как некоторое наиболее обобщенное, комплексное свойство продукции, рассматривается на самом низком, нулевом уровне иерархической совокупности свойств, а составляющие его менее обобщенные свойства – на более высоком [15, 41, 42].

В таблице 10.17 представлена иерархическая совокупность свойств рассматриваемых свойств жести, где i – номер уровня иерархии, j – номер свойства на данном уровне.

Таблица 10.17 - Иерархическая совокупность свойств жести

$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
Качество жести в целом	Качество металла	Колеблемость химического состава в готовом прокате	Углерод
			Марганец
			Кремний
			Фосфор
			Сера
			Хром
			Никель
			Медь
			Азот
			Алюминий
		Механические свойства	Твердость, HR 30TA
			Глубина сферической лунки, мм

В квалиметрии имеются дифференциальная оценка показателя качества и комплексная оценка показателя качества.

Как считают авторы [41], наиболее приемлемой дифференциальной оценкой качества металлопродукции будет вероятность удовлетворения требований стандарта. Такая оценка используется в работе для случая нормального распределения показателей

Для вычисления дифференциальной оценки необходимо по формуле (10.6) определить среднее значение и по формуле (10.7) среднее квадратическое отклонение [12]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (10.6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (10.7)$$

где n – объем выборки; x_i – элемент выборки.

Объем необходимой выборки определяется по формуле:

$$N = e + f \cdot v, \quad (10.8)$$

где v – коэффициент вариации; e и f – коэффициенты (таблица 10.18).

Таблица 10.18 - Коэффициенты для расчета объема выборки

$v, \%$	e	f
$5 < v \leq 10$	-7	2,2
$10 < v \leq 15$	-19	3,4
$15 < v \leq 20$	-46	5,2
$20 < v \leq 25$	-82	7,0
$25 < v \leq 30$	-1327	56,8

Для случая нормального распределения дифференциальную оценку качества p определяли по формуле:

$$p = \Phi\left(\frac{K^B - \bar{X}}{S}\right) - \Phi\left(\frac{K^H - \bar{X}}{S}\right), \quad (10.9)$$

где Φ – функция Лапласа [8], K^B – правосторонняя граница величины показателя качества;

K^H - левосторонняя граница величины показателя качества.

При двусторонних границах K^H и K^B всегда положительные числа. При односторонней границе с ограничением слева $K^H > 0$; $K^B = \infty$.

Комплексная оценка (P_0) качества может быть определена на любом уровне иерархии, но наиболее общая на нулевом:

$$P_0 = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n p_{ij}, \quad (10.10)$$

где – m число уровней подчиненности ($0 \leq i \leq m$);

n – число показателей качества ($1 \leq j \leq n$).

Использование комплексных показателей качества создает возможность для «прикрытия» низкого уровня одних свойств, более высоким уровнем других [26].

Таким образом, «перекрытие» одних свойств другими, в подавляющем числе случаев возможно, но только в определенных пределах. Иначе говоря, нужно обеспечить, чтобы комплексный показатель падал до нуля в тех

случаях, когда какое-то из главнейших свойств качества выходит за допустимые пределы. Существует целый ряд возможных решений этой проблемы, в частности, использование «коэффициента вето» [13].

Для определения величины «коэффициента вето» приняты обозначения:

R – количество металла со значением данного показателя за пределами требований стандарта;

$[R]$ – предельно допустимое значение R .

В случае двусторонних границ:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } R_{ijH} \leq [R]_{ijH} \text{ и } R_{ijB} \leq [R]_{ijB}; \\ 0, \text{ если } R_{ijB} > [R]_{ijB} \text{ и } R_{ijH} > [R]_{ijH} \end{cases} \quad (10.11)$$

Тогда:

$$P_0 = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n (p_{ij} \cdot w_{ij}). \quad (10.12)$$

Из условия $p + R_H + R_B = 1$ для случая односторонней границы коэффициент вето w_{ij} может быть вычислен по зависимости:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } p_{ij} \geq (1 - [R]_{ij}); \\ 0, \text{ если } p_{ij} < (1 - [R]_{ij}). \end{cases} \quad (10.13)$$

где p_{ij} – оценка измеренного значения показателя качества

Исходные данные, а именно содержание химических элементов и механических свойств, для квалиметрической оценки черной жести марки 08кп взяты из описательной характеристики основных выборочных данных в таблицах 1.14-10.16.

Требования к качеству черной жести установлены в технических условиях ГОСТ Р 52204-2004. Свойства жести, в соответствии с описанной методикой расчета комплексной оценки, объединили в иерархическую совокупность, приведенную в таблице 10.19.

Таблица 10.19 - Иерархическая совокупность свойств черной жести марки 08кп (i – уровни)

$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
q_0	$q_{1.1}$	$q_{2.1}$	$q_{3.1}$
			$q_{3.2}$
			$q_{3.3}$
			$q_{3.4}$
			$q_{3.5}$
			$q_{3.6}$
			$q_{3.7}$
			$q_{3.8}$
			$q_{3.9}$
			$q_{3.10}$
			$q_{2.2}$
	$q_{3.12}$		

Индексация в таблице 10.19:

- 0 – качество в целом;
- 1.1 – качество металла;
- 2.1 – химический состав стали;
- 2.2 – механические свойства стали;
- 3.1 – 3.10 – содержание в стали соответственно углерода, марганца, кремния, фосфора, серы, хрома, никеля, меди, азота, алюминия;
- 3.11 – механическое свойство, определяемое при испытаниях на твердость;
- 3.12 - степень вытяжки - глубина сферической лунки, мм.

Иерархическая совокупность свойства (таблица 10.19) составлена с учетом всех требований, предъявляемых к черной жести из стали 08кп.

Требования к показателям качества черной жести стали марки 08кп приведены ниже (ГОСТ Р 52204-2004):

Углерод, %	не более 0,06
Марганец, %.....	0,20-0,35
Кремний, %	не более 0,020
Фосфор, %.....	не более 0,015
Сера, %	не более 0,022
Хром, %.....	не более 0,06
Никель, %	не более 0,06
Медь, %.....	не более 0,10
Азот, %	не более 0,008
Алюминия, %.....	0,02-0,07
Твердость, ед HR 30TA.....	см. таблицу 10.2
Глубина сферической лунки, мм	см. таблицу 10.4

Таким образом, выражение (10.10) для комплексной оценки качества в целом принимает вид:

$$P_0 = \prod_{i=1}^1 \prod_{j=1}^{12} (p_{ij} w_{ij}). \quad (10.14)$$

Следующим этапом оценки качества черной жести различных толщин является определение по каждому показателю качества q_{ij} дифференциальной оценки.

Расчетные значения комплексных и единичных показателей качества (комплексные и дифференциальные оценки) с учетом «коэффициента вето» сведены в таблицы 10.20-10.21.

Таблица 10.20 – Индексы показателей, фактические значения дифференциальных и комплексных оценок для жести стали 08 кп, толщина 0,19-0,23мм

$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
0,3904	0,3904	0,990	0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
		0,8670	

Таблица 10.21 – Индексы показателей, фактические значения дифференциальных и комплексных оценок для жести стали 08 кп, толщина 0,25-0,26 мм

$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
0,8089	0,8089	0,990	0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
		0,8171	0,8859
			0,9223

Таблица 10.22 – Индексы показателей, фактические значения дифференциальных и комплексных оценок для жести стали 08 кп, толщина 0,28-0,32 мм

$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
0,4735	0,4735	0,990	0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
			0,999
		0,4783	0,7392
			0,6470

Из таблиц 10.20 – 10.22 видно, что комплексные оценки качества жести стали марки 08кп различных толщин составляют - 0,3904; 0,8089 и 0,4735.

Из сравнения по шкале желательности (таблица 10.23) следует, что жесьть толщиной 0,25-0,26 мм по безразмерной шкале имеет очень хорошее качество, то есть эталон, а качество полос толщиной 0,28-0,32 мм и 0,19-0,23 мм соответствует первому сорту.

Комплексная оценка качества жести стали марки 08кп по исследуемым толщинам составляет в среднем 0,736, что по безразмерной шкале желательности соответствует оценке «высший сорт».

Таблица 10.23 - Шкала желательности

Безразмерная шкала	Показатель K_0	Уровень качества
Очень хорошо	0,80...1,00	Эталон
Хорошо	0,63...0,80	Высший сорт
Удовлетворительно	0,37...0,63	Первый сорт
Плохо	0,20...0,37	Второй сорт
Очень плохо	0,00...0,20	Брак

11 Математическая модель ресурса пластичности жести, прокатываемой на стане 1400

11.1 Особенности холодной прокатки жести

Холодная прокатка жести характеризуется большими суммарными обжатиями, которые достигают 80-90% и выше. В связи с этим, в процессе прокатки происходит существенное изменение свойств стали. Показатели пластичности уменьшаются, а показатели прочности увеличиваются, уменьшается сопротивление коррозии и теплопроводность. При этом, учитывая то, что прокатка ведется с натяжением, а толщина прокатываемого металла в последних клетях может быть менее 0,3 мм, значительно возрастает риск порыва полосы. Концы полос, вследствие сильного наклепа очень травмоопасны для оборудования стана и, в первую очередь, для валков. Таким образом, в случае порыва полосы велика вероятность дополнительных затрат времени на перевалку поврежденных валков, что снижает производительность стана и увеличивает расход валков. Кроме того, при недостаточной пластичности прокатываемого металла, имеющей место при производстве жести, велик риск возникновения и развития поверхностных дефектов полосы, которые также влияют на пластичность металла в процессе прокатки и на качество готового продукта [2].

Прокатка жести осуществляется в холодном состоянии и рассматривается как частный случай общей теории холодной прокатки. Поэтому, при разработке модели учитывались полученные ранее данные по моделированию холодной прокатки листа на непрерывных станах. При этом принимались во внимание особенности холодной прокатки жести на станах бесконечной прокатки в заданных диапазонах размеров полос, с учетом особенностей очага деформации и технологических факторов.

Очаг деформации при прокатке жести, так же как и при холодной прокатке, состоит из участков упругого сжатия, пластической деформации и упругого восстановления полосы. Из-за весьма больших удельных и полных давлений металла на валки при прокатке жести, также имеет место упругая деформация валков – их изгиб и сплющивание.

В результате упругого сплющивания валков, сжатия и восстановления полосы дуга контакта значительно возрастет: по данным А.А. Королева на 30-60%, по данным Е.С. Рокотяна на 100% от теоретически рассчитанной.

Из-за упругого сжатия полосы длина дуги контакта на входе в валки увеличивается. Упругое восстановление полосы имеет место на линии контакта, из-за чего длина дуги контакта на выходе из валков увеличивается. Упругая деформация валков приводит к увеличению длины дуги контакта на входе в валки и на выходе из валков.

Параметры очага деформации при холодной прокатке жести могут быть рассчитаны по приведенному ниже алгоритму.

11.2 Алгоритм расчета параметров холодной прокатки жести

Алгоритм разработан с использованием работ Грудева А.П. [28, 42].

Абсолютное обжатие Δh в данном проходе и абсолютное суммарное обжатие Δh_{Σ} с учетом данного прохода:

$$\Delta h = \frac{h_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{100}; \quad (11.1)$$

$$\Delta h_{\Sigma} = \frac{h_0 \varepsilon_1}{100}, \quad (11.2)$$

где h_0 – исходная толщина полосы;

ε_0 – суммарное относительное обжатие в проходах, предшествующих данному проходу;

ε_1 – суммарное относительное обжатие с учетом данного прохода.

Толщина полосы после данного прохода:

$$h_1 = h_0 - \Delta h_{\Sigma}. \quad (11.3)$$

Среднее значение предела текучести с учетом влияния основных факторов деформации при холодной прокатке:

- для предварительно отожженного металла

$$\sigma_{TC} = K_T \left(\sigma_{T0} + \frac{\pi}{4} a_T \sqrt{\varepsilon_1} \right); \quad (11.4)$$

- для предварительно наклепанного металла

$$\sigma_{TC} = K_T \left[\sigma_{T0} + \frac{a_T}{4} \left(\sqrt{\varepsilon_0} + \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}} \arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}}{\varepsilon_1} \right) \right], \quad (11.5)$$

где σ_{T0} – исходный (после горячей прокатки или отжига) предел текучести металла;

a_T – эмпирический коэффициент, учитывающий марку прокатываемой стали;

K_T – (1,17 – 1,22) – эмпирический коэффициент, учитывающий скорость деформации и разогрев металла в очаге деформации.

Длина дуги захвата l_c с учетом упругой деформации валков:

$$l_c = \sqrt{R\Delta h + X_2^2} + X_2, \quad (11.6)$$

где R – радиус недеформированного валка;

$X_0 = 8Rp_c \frac{1-\nu^2}{\pi E}$ – приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков;

p_c – среднее давление, принимаемое в первом приближении равным σ_{T0} ;

$8 \frac{1-\nu^2}{\pi E}$ – константа упругости, характеризуемая коэффициентом Пуассона и модулем упругости материала валков.

Для стальных валков можно принять $\nu=0,3$ и $E= 2,2 \cdot 10^4$ кг/мм² = $2 \cdot 10^5$ МПа; для калиброванных: $\nu=0,3$ и $E= 6,64 \cdot 10^4$ кг/мм² = $6,64 \cdot 10^5$ МПа.

Угол захвата α_c с учетом упругой деформации валков:

$$\alpha_c = \frac{\Delta h}{l_c}. \quad (11.7)$$

Отношение нейтрального угла γ к углу захвата α_c :

$$\frac{\gamma}{\alpha_c} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a\alpha_c}{f} \right), \quad (11.8)$$

где f – коэффициент трения;

a – эмпирический коэффициент, учитывающий положение центра тяжести эпюры предела текучести;

$a=0,465$ – для предварительно отожженного металла;

$a=0,465+0,0008 \varepsilon_0$ – для предварительно наклепанного металла.

Высота полосы h_H в нейтральном сечении:

$$h_H = h_1 + \frac{2l_c^2}{\Delta h} (1 - \cos \gamma), \quad (11.9)$$

где $\gamma = \alpha_c \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)$.

Средняя высота полосы h_{c1} и h_{c2} в зонах отставания и опережения соответственно:

$$h_{c1} = \frac{h_0 + 2h_H}{3}; \quad (11.10)$$

$$h_{c2} = \frac{h_H + 2h_1}{3}. \quad (11.11)$$

Длина дуг l_2 и l_1 зон опережения и отставания соответственно:

$$l_2 = l_c \frac{\gamma}{\alpha_c}; \quad (11.12)$$

$$l_1 = l_c - l_2. \quad (11.13)$$

Коэффициенты K_2 и K_1 , учитывающие распределение предела текучести в зонах опережения и отставания соответственно:

- для предварительно отожженного металла

$$K_2 = 1,078 + 0,057 \frac{\gamma}{\alpha_c}; \quad (11.14)$$

- для предварительно наклепанного металла:

$$K_2 = (1 - 0,00142\varepsilon_0) + (0,1 + 0,0002\varepsilon_0) \frac{\gamma}{\alpha_c}; \quad (11.15)$$

$$K_1 = \frac{1 - K_2 \frac{\gamma}{\alpha_c}}{1 - \frac{\gamma}{\alpha_c}}. \quad (11.16)$$

Коэффициенты ω_1 и ω_2 продольного напряжения в зонах отставания и опережения соответственно:

$$\omega_1 = \frac{(f - a_1 \alpha_c) l_1}{h_{c1}}; \quad (11.17)$$

$$\omega_2 = \frac{(f - a_2 \alpha_c) l_2}{h_{c2}}, \quad (11.18)$$

где $a_1 = 0,456 - 0,55 \frac{\gamma}{\alpha_c}$ и $a_2 = 0,01 + 0,5 \frac{\gamma}{\alpha_c}$ – эмпирические коэффициенты, учитывающие распределение предела текучести в зонах отставания и опережения.

Средние продольные напряжения σ_{x1} и σ_{x2} в зонах отставания и опережения соответственно:

$$\sigma_{x1} = K_1 \sigma_{TC} \omega_1; \quad (11.19)$$

$$\sigma_{x2} = K_2 \sigma_{TC} \omega_2. \quad (11.20)$$

Относительные длины дуг l_{01} и l_{02} зон отставания и опережения соответственно:

$$l_{01} = \frac{l_1}{l_C}; \quad (11.21)$$

$$l_{02} = \frac{l_2}{l_C}. \quad (11.22)$$

Коэффициенты n_1 , n_2 и n_p вертикального напряжения (подпора) в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$n_1 = 1 + \omega_1; \quad (11.23)$$

$$n_2 = 1 + \omega_2; \quad (11.24)$$

$$n_p = n_1 l_{01} + n_2 l_{02}. \quad (11.25)$$

Средние давления p_1 , p_2 и p_C в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$p_1 = K_1 \sigma_{TC} + \sigma_{x1} = K_1 \sigma_{TC} n_1; \quad (11.26)$$

$$p_2 = K_2 \sigma_{TC} + \sigma_{x2} = K_2 \sigma_{TC} n_2; \quad (11.27)$$

$$p_C = p_1 l_{01} + p_2 l_{02}. \quad (11.28)$$

Показатели сил трения f_{C1} , f_{C2} и f_C в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$f_{C1} = \frac{h_{C1}}{l_1} \omega_1 + n_1 a_1 \alpha_C; \quad (11.29)$$

$$f_{C2} = \frac{h_{C2}}{l_2} \omega_2 + n_2 a_2 \alpha_C; \quad (11.30)$$

$$f_C = f_{C1} l_{01} + f_{C2} l_{02}. \quad (11.31)$$

Уточнённая длина дуги захвата l'_C с учетом упругой деформации валков:

$$l'_c = \sqrt{R\Delta h + X_0'^2} + X_0', \quad (11.32)$$

где $X_0' = \frac{8RP_c(1-\nu^2)}{\pi E}$ – уточненное приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков.

Уточнённый угол захвата α'_c с учетом упругой деформации валков:

$$\alpha'_c = \frac{\Delta h}{l'_c}. \quad (11.33)$$

Пределы текучести σ_{T0} и σ_{T1} в начале и конце очага деформации соответственно:

$$\sigma_{T0} = m_0\sigma_{TC} = (0.73 + 0.005\varepsilon_0)\sigma_{TC}; \quad (11.34)$$

$$\sigma_{T1} = m_1\sigma_{TC} = [0.88 - 0.002\varepsilon_0 + 0.0015(\varepsilon_1 - 30)]\sigma_{TC}, \quad (11.35)$$

где m_0 и m_1 – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние на предел текучести суммарной степени деформации.

Максимальное давление p_M в очаге деформации:

$$p_M = K_1\sigma_{TC} \left[1 + \frac{l_1}{h_H} (f_{c1} - n_1 a_1 \alpha'_c) \right]. \quad (11.36)$$

Коэффициенты плеча равнодействующих ψ_1 и ψ_2 в зонах отставания и опережения соответственно:

$$\psi_1 = \frac{(p_M + \sigma_{T0}) \left(\frac{l_1}{3} + \frac{l_2}{2} \right)}{p_1 l'_c}; \quad (11.37)$$

$$\psi_2 = \frac{\left(\frac{p_M}{3} + \frac{\sigma_{T1}}{6} \right) l_2^2}{p_2 l'_c}. \quad (11.38)$$

Коэффициент плеча равнодействующей ψ_c относительно вертикальной оси сплюсненной дуги:

$$\psi_c = \frac{l_1 \left[\sigma_{T0} \left(\frac{l_1}{3} + \frac{l_2}{2} \right) + p_M \left(\frac{l_1}{6} + \frac{l_2}{2} \right) + l_2^2 \left(\frac{p_M}{3} + \frac{\sigma_{T1}}{6} \right) \right]}{l'_c \left[\frac{l_1}{2} (p_M + \sigma_{T0}) + \frac{l_2}{2} (p_M + \sigma_{T1}) \right]}. \quad (11.39)$$

Угол α_x , характеризующий положение равнодействующей на дуге захвата:

$$\alpha_x = \psi_c \alpha'_c. \quad (11.40)$$

Уточнённое отношение нейтрального угла к углу захвата:

$$\left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)' = \frac{1 - \frac{m_p \alpha_c}{f_{c1} K_1}}{1 + \frac{f_{c2} K_2}{f_{c1} K_1}}. \quad (11.41)$$

Уточнённая высота полосы h'_H в нейтральном сечении:

$$h'_H = h_1 + \frac{2l_c'^2}{\Delta h} (1 - \cos \gamma'). \quad (11.42)$$

Уточнённая средняя высота полосы h'_{c1} и h'_{c2} в зонах отставания и опережения соответственно:

$$h'_{c1} = \frac{h_0 + 2h'_H}{3}; \quad (11.43)$$

$$h'_{c2} = \frac{h'_H + 2h_1}{3}. \quad (11.44)$$

Уточнённая длина дуг l'_2 и l'_1 зон опережения и отставания соответственно:

$$l'_2 = l'_c \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)'; \quad (11.45)$$

$$l'_1 = l'_c - l'_2. \quad (11.46)$$

Коэффициенты K_2 и K_1 , учитывающие распределение предела текучести в зонах опережения и отставания соответственно:
- для предварительно отожженного металла

$$K'_2 = 1,078 + 0,057 \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)'; \quad (11.47)$$

- для предварительно наклепанного металла

$$K'_2 = (1 - 0,00142\varepsilon_0) + (0,1 + 0,0002\varepsilon_0) \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)'; \quad (11.48)$$

$$K'_1 = \frac{1 - K'_2 \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)'}{1 - \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)'}. \quad (11.49)$$

Уточнённые относительные длины дуг l'_{01} и l'_{02} зон отставания и опережения соответственно:

$$l'_{01} = \frac{l'_1}{l'_c}; \quad (11.50)$$

$$l'_{02} = \frac{l'_2}{l'_c}. \quad (11.51)$$

Уточнённые коэффициенты ω'_1 и ω'_2 продольного напряжения в зонах отставания и опережения соответственно:

$$\omega'_1 = \frac{(f_{c1} - n_1 \psi_1 \alpha'_c) l'_1}{h'_{c1}}; \quad (11.52)$$

$$\omega'_2 = \frac{(f_{c2} - n_2 \psi_2 \alpha'_c) l'_2}{h'_{c2}}. \quad (11.53)$$

Уточнённые средние продольные напряжения σ'_{x1} и σ'_{x2} в зонах отставания и опережения соответственно:

$$\sigma'_{x1} = K'_1 \sigma_{TC} \omega'_1; \quad (11.54)$$

$$\sigma'_{x2} = K'_2 \sigma_{TC} \omega'_2. \quad (11.55)$$

Уточнённые коэффициенты n'_1, n'_2 и n'_p вертикального напряжения в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$n'_1 = 1 + \omega'_1; \quad (11.56)$$

$$n'_2 = 1 + \omega'_2; \quad (11.57)$$

$$n'_p = n'_1 l'_{01} + n'_2 l'_{02}. \quad (11.58)$$

Уточнённые средние давления p'_1 , p'_2 и p'_c в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$p'_1 = K'_1 \sigma_{TC} + \sigma'_{x1} = K'_1 \sigma_{TC} n'_1; \quad (11.59)$$

$$p'_2 = K'_2 \sigma_{TC} + \sigma'_{x2} = K'_2 \sigma_{TC} n'_2; \quad (11.60)$$

$$p'_c = p'_1 l'_{01} + p'_2 l'_{02}. \quad (11.61)$$

Полное усилие металла на валки:

$$P_{II} = l'_c b_c p'_c, \quad (11.62)$$

где b_c – ширина полосы.

Уточнённые показатели сил трения f'_{c1} , f'_{c2} и f'_c в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$f'_{c1} = \frac{h'_{c1}}{l'_1} \omega'_1 + n'_1 \psi_1 \alpha'_c; \quad (11.63)$$

$$f'_{c2} = \frac{h'_{c2}}{l'_2} \omega'_2 + n'_2 \psi_2 \alpha'_c; \quad (11.64)$$

$$f'_c = f'_{c1} l'_{01} + f'_{c2} l'_{02}. \quad (11.65)$$

Коэффициент l_{c1} сплющивания валков:

$$l_{c1} = \frac{l'_c}{l}, \quad (11.66)$$

где $l = \sqrt{R\Delta h}$ – длина недеформированной дуги.

Коэффициент плеча равнодействующей ψ относительно вертикальной оси валков:

$$\psi = \psi_c l_{c1} - \frac{X'_0}{l}. \quad (11.67)$$

Момент M_d , необходимый для деформации:

$$M_d = P_{II} \psi l. \quad (11.68)$$

Коэффициент K_p , равный отношению максимального давления в очаге деформации к среднему:

$$K_p = \frac{P_M}{P'_C}. \quad (11.69)$$

Радиус сплющивания валка:

$$R_C = \frac{l_C^2}{\Delta h}. \quad (11.70)$$

Положение нейтрального сечения с учетом натяжения концов полосы:

$$\frac{\gamma}{\alpha_c} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha'_c}{f} \right) + \frac{h_1 (q_1 - q_0)}{4\alpha'_c \cdot f \cdot P_{cp} \cdot R_C}, \quad (11.71)$$

где q_1 и q_0 – соответственно переднее и заднее удельное натяжение.

Высота полосы h_H в нейтральном сечении:

$$h_H = h_1 + \frac{2l_C^2}{\Delta h} (1 - \cos \gamma), \quad (11.72)$$

где $\gamma = \alpha_c \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)$ - нейтральный угол.

Средняя высота полосы h_{c1} и h_{c2} в зонах отставания и опережения соответственно:

$$h_{c1} = \frac{h_0 + 2h_H}{3}; \quad h_{c2} = \frac{h_H + 2h_1}{3}. \quad (11.73)$$

Длина дуг l_2 и l_1 зон опережения и отставания соответственно:

$$l_1 = l'_C - l_2; \quad l_2 = l'_C \frac{\gamma}{\alpha_c}. \quad (11.74)$$

Среднее давление в зонах отставания и опережения соответственно:

$$p_1 = K_1 \sigma_{TC} \left[1 + \frac{(f_{C1} - n_1 \psi_1 \alpha'_C) l_1}{h_{C1}} - \Pi_0 \right]; \quad (11.75)$$

$$p_2 = K_2 \sigma_{TC} \left[1 + \frac{(f_{C2} - n_2 \psi_2 \alpha'_C) l_2}{h_{C2}} - \Pi_1 \right], \quad (11.76)$$

где $\Pi_0 = \frac{q_0}{K_1 \sigma_{TC}}$ и $\Pi_1 = \frac{q_1}{K_2 \sigma_{TC}}$ – коэффициенты заднего и переднего натяжения соответственно.

Среднее давление для всего очага деформации:

$$p_C = p_1 \frac{l_1}{l'_C} + p_2 \frac{l_2}{l'_C}. \quad (11.77)$$

Максимальное давление в очаге деформации:

$$p_M = K_1 \sigma_{TC} \left[1 + \frac{l_1}{h_H} (f_{C1} - n_1 \psi_1 \alpha'_C) - \Pi_0 \right]. \quad (11.78)$$

Коэффициенты n_1 , n_2 и n_p вертикального напряжения (подпора) в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно:

$$n_1 = \frac{p_1}{K_1 \sigma_{TC}}; \quad n_2 = \frac{p_2}{K_2 \sigma_{TC}}; \quad n_p = \frac{p_C}{\sigma_{TC}}. \quad (11.79)$$

Пределы текучести с учетом натяжения в начале и конце очага деформации соответственно:

$$\sigma_{T0} = m_0 \sigma_{TC} - K_1 n_0 \sigma_{TC} = m_0 \sigma_{TC} - q_0; \quad (11.80)$$

$$\sigma_{T1} = m_1 \sigma_{TC} - K_2 n_2 \sigma_{TC} = m_1 \sigma_{TC} - q_1; \quad (11.81)$$

$$m_0 = 0,73 + 0,005 \varepsilon_0; \quad (11.82)$$

$$m_1 = 0,88 - 0,002 \varepsilon_0 + 0,0015 (\varepsilon_1 - 30), \quad (11.83)$$

где m_0 и m_1 – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние на предел текучести суммарной степени деформации.

Коэффициенты плеча равнодействующих в зонах отставания и опережения соответственно:

$$\psi_1 = \frac{p_M \left(\frac{l_1}{3} + l_2 \right) + \sigma_{T0} \left(\frac{2l_1}{3} + l_2 \right)}{l_C (p_M + \sigma_{T0})}; \quad \psi_2 = \frac{l_2 (2p_M + \sigma_{T1})}{3(p_M + \sigma_{T1})l_C}. \quad (11.84)$$

Показатели сил трения в зонах отставания и опережения соответственно:

$$f_{c1} = \frac{h_{c1}}{2l_1} (n_1 - 1) + n_1 \psi_1 \alpha'_c + \frac{\Pi_0 h_{c1}}{2l_1}; \quad f_{c2} = \frac{h_{c2}}{2l_2} (n_2 - 1) + n_2 \psi_2 \alpha'_c + \frac{\Pi_1 h_{c2}}{2l_2}. \quad (11.85)$$

Длина дуги захвата l_c с учетом упругой деформации валков:

$$l'_c = \sqrt{R\Delta h + X_0^2} + X_0, \quad (11.86)$$

где $X_0 = p_c \cdot m \cdot c$ – приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков;

m – коэффициент, зависящий от механических свойств материала валков;

c – поправочный коэффициент, изменяется в пределах 1,2 – 1,5.

Уточнённый радиус сплющивания валков:

$$R'_c = \frac{l_c'^2}{\Delta h}. \quad (11.87)$$

Уточнённое положение нейтрального сечения с учетом натяжения концов полосы:

$$\left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)' = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha'_c}{2f} \right) + \frac{h_1 (q_1 - q_0)}{2\alpha'_c \cdot f \cdot p_c \cdot R'_c}, \quad (11.88)$$

где $\alpha'_c = \frac{\Delta h}{l'_c}$ – уточненный угол захвата.

Опережение при прокатке:

$$S = \gamma^2 \frac{R'_c}{h_1}, \quad (11.89)$$

где $\gamma = \alpha_c \left(\frac{\gamma}{\alpha_c} \right)'$ – нейтральный угол.

Окружная скорость валков:

$$v_B = \frac{v_1}{1+S}, \quad (11.90)$$

где v_1 – скорость переднего конца полосы.

Уточнённая высота полосы в нейтральном сечении:

$$h_H = h_1 + \frac{2l_C'^2}{\Delta h} (1 - \cos \gamma'). \quad (11.91)$$

Уточнённая средняя высота полосы в зонах отставания и опережения:

$$h'_{c1} = \frac{h_0 + 2h'_H}{3}; \quad h'_{c2} = \frac{h_0 + 2h'_1}{3}. \quad (11.92)$$

Уточнённые длины дуг в зонах отставания и опережения:

$$l'_1 = l_C - l'_2; \quad l'_2 = l'_C \left(\frac{\gamma}{\alpha_C} \right)'. \quad (11.93)$$

Уточнённые значения коэффициентов, учитывающих характер распределения предела текучести в зонах отставания и опережения:

- для предварительно отожженного металла

$$K'_2 = 1,078 + 0,057 \left(\frac{\gamma}{\alpha_C} \right)'; \quad (11.94)$$

- для предварительно наклепанного металла

$$K'_2 = (1 - 0,00142\varepsilon_0) + (0,1 + 0,0002\varepsilon_0) \left(\frac{\gamma}{\alpha_C} \right)'; \quad (11.95)$$

$$K'_1 = \frac{1 - K'_2 \left(\frac{\gamma}{\alpha_C} \right)'}{1 - \left(\frac{\gamma}{\alpha_C} \right)'}. \quad (11.96)$$

Уточнённые средние давления в зонах отставания и опережения:

$$p'_1 = K'_1 \sigma_{TC} \left[1 + \frac{(f_{c1} - n_1 \psi_1 \alpha'_C) l'_1}{h'_{c1}} - \Pi_0 \right]; \quad (11.97)$$

$$p'_2 = K'_2 \sigma_{TC} \left[1 + \frac{(f_{c2} - n_2 \psi_2 \alpha'_c) l'_2}{h'_{c2}} - \Pi_1 \right], \quad (11.98)$$

где $\Pi_0 = \frac{q_0}{K'_1 \sigma_{TC}}$ и $\Pi_1 = \frac{q_1}{K'_2 \sigma_{TC}}$ - коэффициенты заднего и переднего натяжения.

Уточнённое среднее давление для всего очага деформации:

$$p'_c = p'_1 \frac{l'_1}{l'_c} + p'_2 \frac{l'_2}{l'_c}. \quad (11.99)$$

Уточнённое максимальное давление в очаге деформации:

$$p'_m = K'_1 \sigma_{TC} \left[1 + \frac{l'_1}{h'_H} (f_{c1} - n_1 \psi_1 \alpha'_c) - \Pi_0 \right]. \quad (11.100)$$

Коэффициент плеча равнодействующей относительно вертикальной оси сплющенной дуги:

$$\psi_c = \frac{l'_1 \left[\sigma_{T0} \left(\frac{l'_1}{3} + \frac{l'_2}{2} \right) + p'_m \left(\frac{l'_1}{6} + \frac{l'_2}{2} \right) + l'^2_2 \left(\frac{p'_m}{3} + \frac{\sigma_{T1}}{6} \right) \right]}{l'_c \left[\frac{l'_1}{2} (p'_m + \sigma_{T0}) + \frac{l'_2}{2} (p'_m + \sigma_{T1}) \right]}. \quad (11.101)$$

Коэффициент подпора для всего очага деформации:

$$n_p = \frac{p'_c}{\sigma_{TC}}. \quad (11.102)$$

Полное усилие металла на валки:

$$P_{II} = l_c b_0 p'_c, \quad (11.103)$$

где b_0 - ширина полосы.

Коэффициент сплющивания валков:

$$l_{ci} = \frac{l'_c}{l}, \quad (11.104)$$

где $l = \sqrt{R \Delta h}$ - длина недеформированной дуги.

Коэффициент плеча равнодействующей относительно вертикальной оси валков:

$$\psi = \psi_c l_{cl} - \frac{X'_0}{l}, \quad (11.105)$$

где $X'_0 = P'_c \cdot m \cdot c$ – уточненное приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков.

Момент, необходимый для деформации:

$$M_d = P_{II} \psi l. \quad (11.106)$$

Мощность прокатки:

$$N_d = M_d \frac{v_B}{R}. \quad (11.107)$$

Коэффициент, равный отношению максимального давления в очаге деформации к среднему:

$$K_p = \frac{P_M}{P_c}. \quad (11.108)$$

Блок-схема алгоритма расчета параметров холодной непрерывной прокатки с учетом натяжения, с использованием формул (11.1) – (11.108), изображена на рис. 11.1.

Расчет по приведенному алгоритму выполняется по ходу прокатки в последовательности, указанной на схеме стрелками.

В прямоугольниках, в некоторых случаях, вместо содержания формулы проставлен ее номер в круглых скобках. Можно обратиться к соответствующей формуле в тексте по ее номеру. Цифры в левой части прямоугольников указывают номер блока и введены для облегчения описания схемы.

Остановимся на узловых местах блок-схемы.

В блоке 1 вводятся исходные данные, в блоке 2 начинается расчёт параметров первого приближения.

Известные методы расчета усилий прокатки предполагают знание среднего давления и длины дуги захвата, необходимой для определения контактной площади.

Длина дуги захвата, в свою очередь, зависит от величины и закона распределения контактного давления. Поэтому блок-схемой предусмотрены предварительный и уточненный расчеты среднего давления, длины дуги захвата, а также других, связанных с ними величин.

Два указанных приближения (итерации) обеспечивают определение расчетных величин с ошибкой, не превышающей 2%.

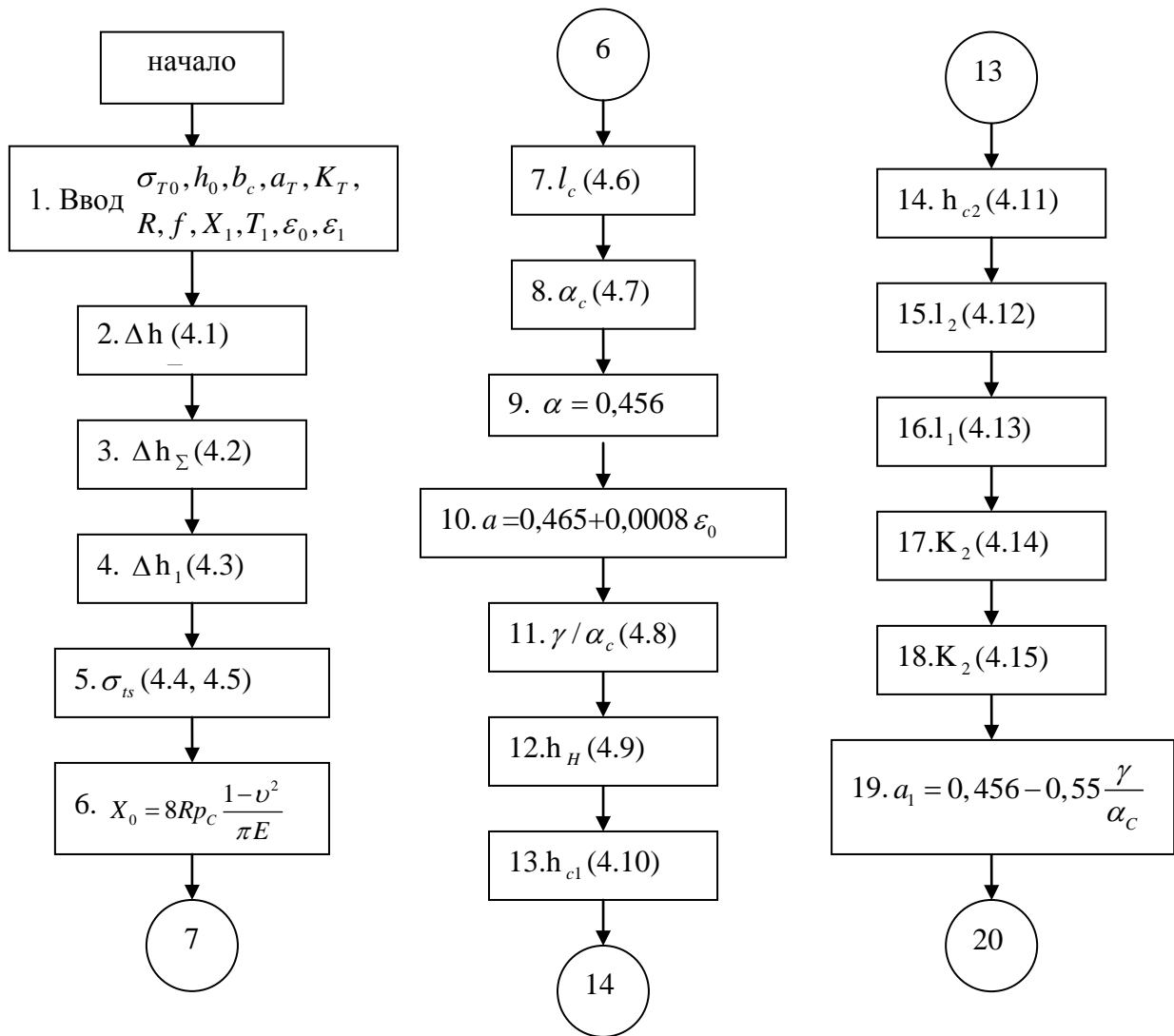
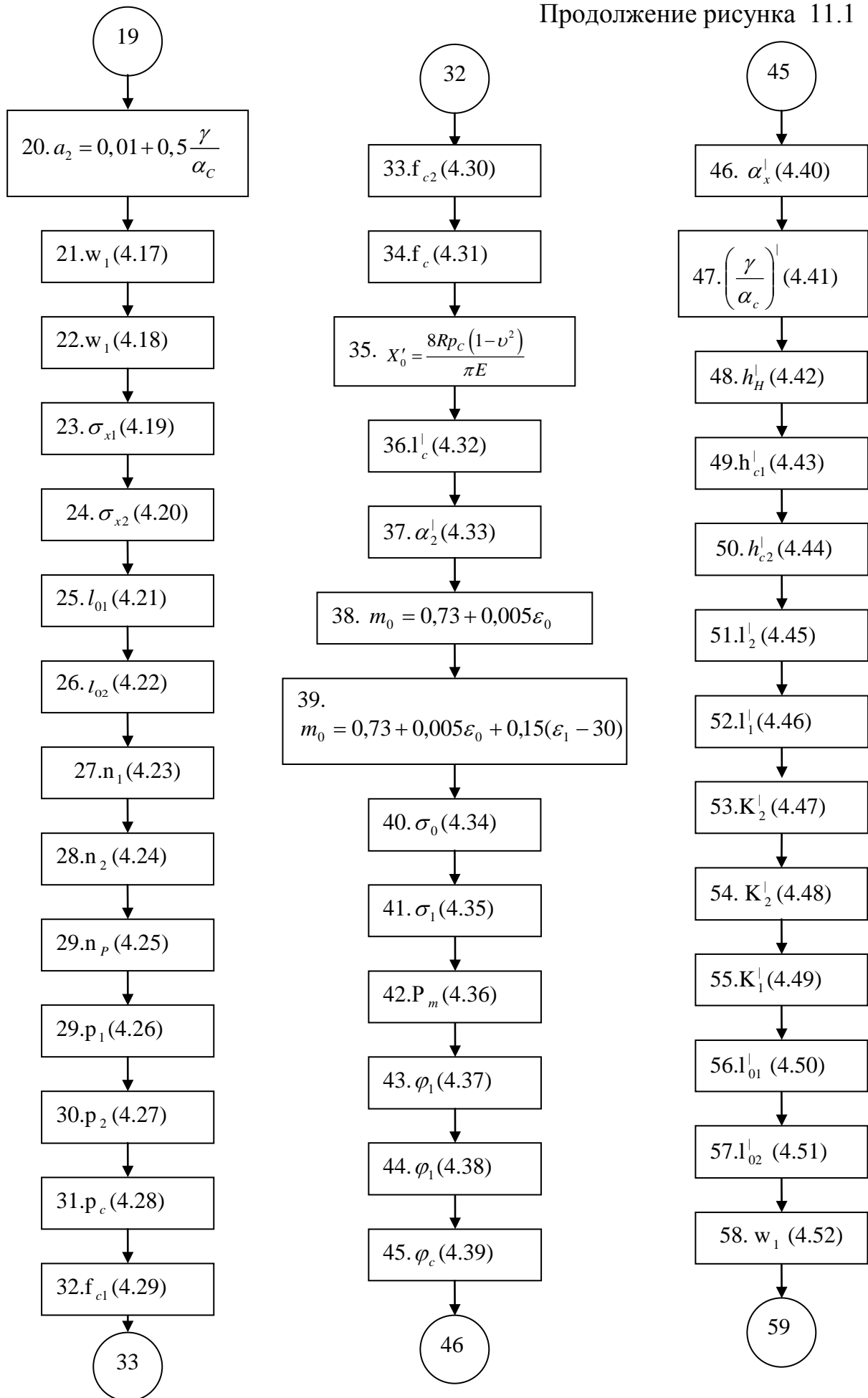
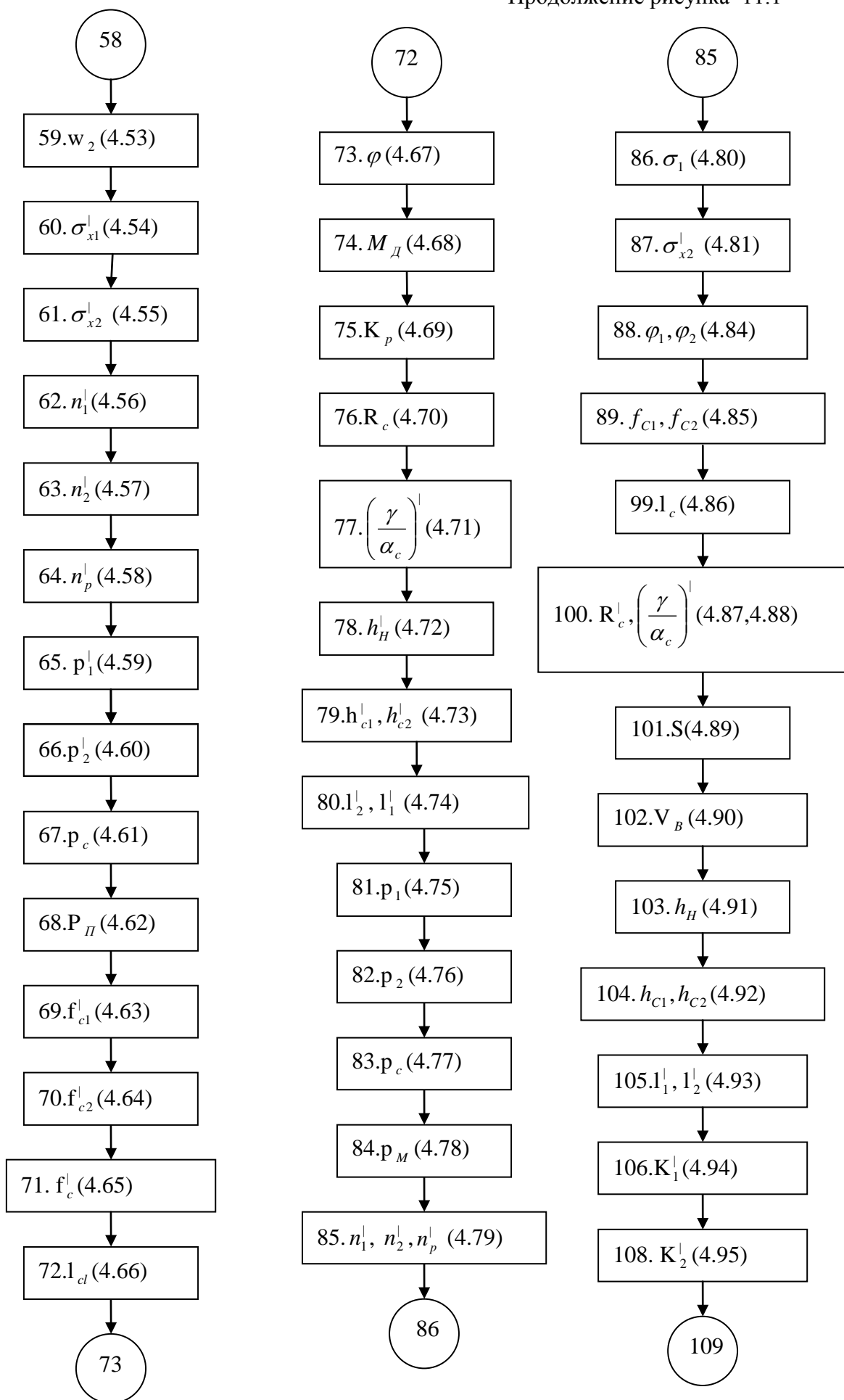
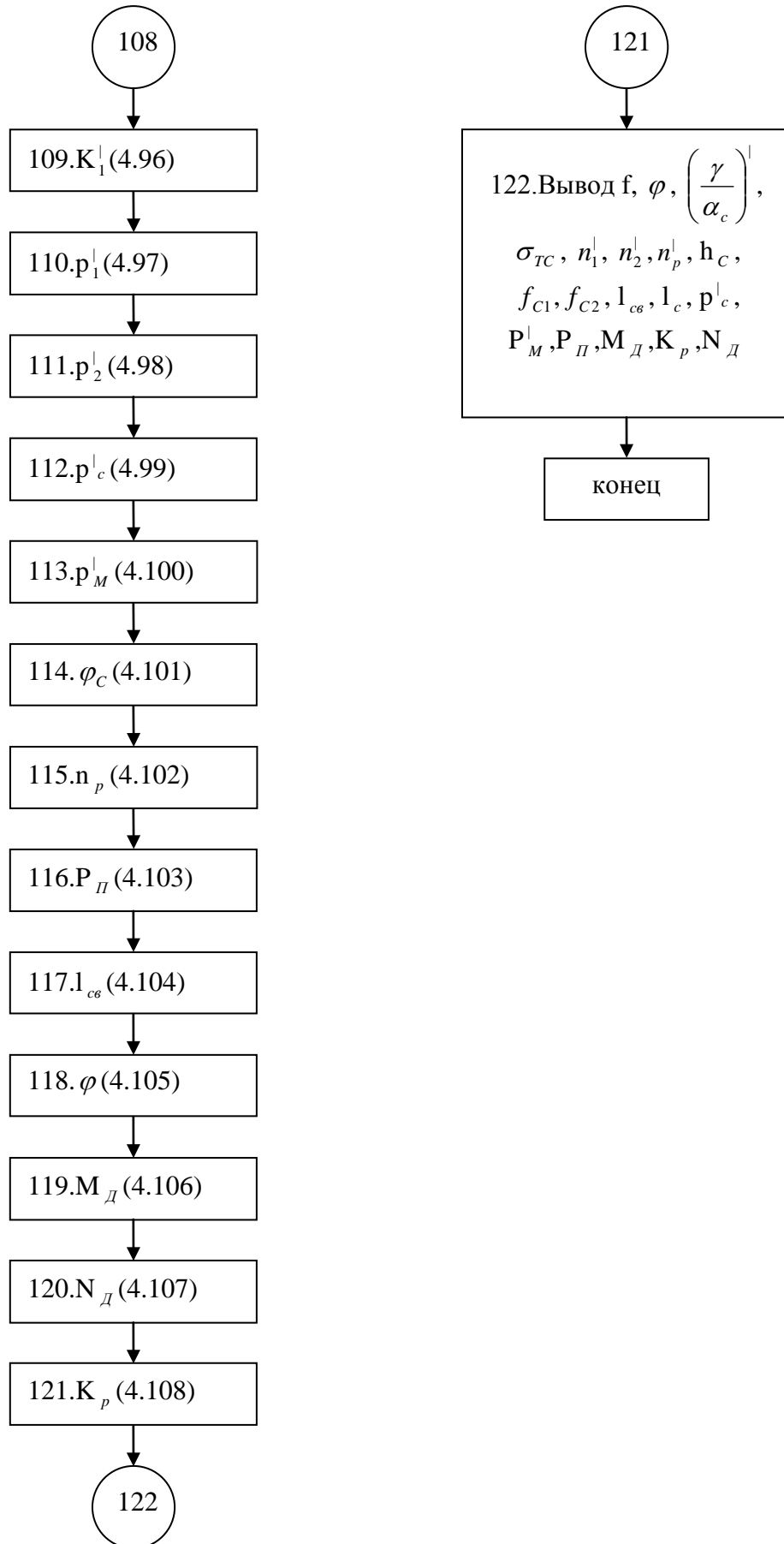


Рисунок 11.1 – Блок-схема алгоритма расчета параметров холодной прокатки







В предварительном расчете, заканчивающемся блоком 34, длина сплюсненной дуга находится с использованием в качестве среднего давления значения среднего предела текучести.

Уточненный расчет начинается с блока 35. Расчет с учётом межклетевого натяжения полосы начинается с блока 95, вывод параметров прокатки в блоке 122. С использованием описанной блок-схемы разработана программа расчёта на компьютере параметров холодной прокатки жести. Программа составлена в табличном процессоре Microsoft Excel 2003.

11.3. Программа расчёта параметров холодной прокатки жести

Программа составлена в Microsoft Excel 2003. В ячейках С3 по Н3 указаны номера клеток. В ячейках С5 и Н6 задаются начальная h_0 и конечная h_k толщина металла, в ячейках С10 по Н10 относительное обжатие по проходам ε . В ячейках С13 по Н13 задаётся значения радиусов рабочих валков R . В ячейках С15 по Н15 задаются значения коэффициента Пуансона ν , в ячейках С16 по Н16 значения модуля упругости материала валков E . В ячейках С21 по Н21 задаются значения коэффициента трения f . В ячейках С58 по Н58 и С59 по Н59 соответственно задаются значения переднего q_1 и заднего q_0 натяжения. В ячейках L3, L4, L5, L7, L10 соответственно задаются значения исходного предела текучести σ_{T0} ; эмпирического коэффициента, учитывающего марку прокатываемой, стали a_T ; эмпирического коэффициента, учитывающего скорость деформации K_T , ширины полосы b , скорости металла на выходе из последней клетки v . В ячейках K58 по P58 и K59 по P59 соответственно задаются значения поправочного коэффициента s и коэффициента m , зависящего от механических свойств материала валков.

В ячейках С7 и Н7 рассчитывается абсолютное обжатие Δh . В ячейках С6 и Н6 рассчитывается толщина полосы после данного прохода h_1 . В ячейках С12 и Н12 рассчитывается среднее значение предела текучести σ_{TC} . Приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков X_0 и длина дуги захвата l_c с учетом упругой деформации валков l_c соответственно рассчитываются в ячейках С17 по Н17 и С18 по Н18. Угол захвата с учетом упругой деформации валков α_c и отношение нейтрального угла γ к углу захвата α_c соответственно рассчитываются в ячейках С19 по Н19 и С22 по Н22. Высота полосы h_H в нейтральном сечении и средняя высота полосы h_{C1} и h_{C2} в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках С24 по Н24, С25 по Н25 и С26 по Н26. Длина дуг l_2 и l_1 зон опережения и отставания соответственно рассчитываются в ячейках С19 по Н19 и С22 по Н22. Коэффициенты K_2 и K_1 , учитывающие распределение предела текучести в зонах опережения и отставания, для предварительно отожженного металла соответственно рассчитываются в ячейках С30 по Н30 и С29 по Н29. Эмпирические коэффициенты a_1 и a_2 , учитывающие

распределение предела текучести в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках С31 по Н31 и С32 по Н32. Коэффициенты ω_1 и ω_2 продольного напряжения в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках С33 по Н33 и С34 по Н34. Средние продольные напряжения σ_{x1} и σ_{x2} в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках С35 по Н35 и С36 по Н36. Относительные длины дуг l_{01} и l_{02} зон отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках С37 по Н37 и С38 по Н38. Коэффициенты n_1 , n_2 и n_p вертикального напряжения (подпора) в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках С39 по Н39, С40 по Н40 и С41 по Н41. Средние давления p_1 , p_2 и p_c в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках С42 по Н42, С43 по Н43 и С44 по Н44. Показатели сил трения f_{c1} , f_{c2} и f_c в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках С45 по Н45, С46 по Н46 и С47 по Н47.

Уточнённое приращение длины дуги захвата за геометрической осью валков X_0^l рассчитывается в ячейках К12 по Р12. Уточнённая длина дуги захвата l'_c с учетом упругой деформации валков рассчитывается в ячейках К13 по Р13. Уточнённый угол захвата α'_c с учетом упругой деформации валков рассчитывается в ячейках К14 по Р14. Пределы текучести σ_{T0} и σ_{T1} в начале и конце очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках К17 по Р17 и К18 по Р18. Максимальное давление P_M в очаге деформации рассчитывается в ячейках К19 по Р19. Коэффициенты плеча равнодействующих ψ_1 и ψ_2 в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках К20 по Р20 и К21 по Р21. Коэффициент плеча равнодействующей ψ_c относительно вертикальной оси сплющенной дуги рассчитывается в ячейках К22 по Р22. Угол α_x , характеризующий положение равнодействующей на дуге захвата рассчитывается в ячейках К23 по Р23.

Уточнённое отношение нейтрального угла к углу захвата $\left(\frac{\gamma}{\alpha_c}\right)^l$ рассчитывается в ячейках К24 по Р24. Уточнённая высота полосы h'_H в нейтральном сечении рассчитывается в ячейках К26 по Р26. Уточнённая средняя высота полосы h'_{c1} и h'_{c2} в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках К27 по Р27 и К28 по Р28. Уточнённая длина дуг l'_2 и l'_1 зон опережения и отставания соответственно рассчитываются в ячейках К30 по Р30 и К29 по Р29. Коэффициенты K_2 и K_1 , учитывающие распределение предела текучести в зонах опережения и отставания соответственно рассчитываются в ячейках К32 по Р32 и К31 по Р31. Уточнённые относительные длины дуг l'_{01} и l'_{02} зон отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках К33 по Р33 и К34 по

Р31. Уточненные коэффициенты ω'_1 и ω'_2 продольного напряжения в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках К35 по Р35 и К36 по Р36. Уточненные средние продольные напряжения σ'_{x1} и σ'_{x2} в зонах отставания и опережения соответственно рассчитываются в ячейках К37 по Р37 и К38 по Р38.

Уточнённые коэффициенты n'_1 , n'_2 и n'_p вертикального напряжения в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках К39 по Р39, К40 по Р40 и К41 по Р41. Уточнённые средние давления p'_1 , p'_2 и p'_c в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках К42 по Р42, К43 по Р43 и К44 по Р44. Полное давление металла на валки P_{II} рассчитывается в ячейках К46 по Р46. Уточнённые показатели сил трения f'_{c1} , f'_{c2} и f'_c в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках К47 по Р47, К48 по Р48 и К49 по Р49. Коэффициент l_{c1} сплющивания валков рассчитывается в ячейках К51 по Р51. Коэффициент плеча равнодействующей ψ относительно вертикальной оси валков рассчитывается в ячейках К52 по Р52. Момент M_d , необходимый для деформации рассчитывается в ячейках К53 по Р53. Коэффициент K_p , равный отношению максимального давления в очаге деформации к среднему рассчитывается в ячейках К54 по Р54. Радиус сплющивания вала рассчитывается в ячейках К55 по Р55.

Положение нейтрального сечения с учетом натяжения концов полосы $\frac{\gamma}{\alpha_c}$ рассчитывается в ячейках С60 по Н60. Высота полосы h_H в нейтральном сечении рассчитывается в ячейках С62 по Н62. Средняя высота полосы h_{c1} и h_{c2} в зонах отставания и опережения соответственно рассчитывается в ячейках С63 по Н63 и С64 по Н64. Длина дуг l_2 и l_1 зон опережения и отставания соответственно рассчитывается в ячейках С66 по Н66 и С65 по Н65. Среднее давление в зонах отставания и опережения p_1 и p_2 соответственно рассчитывается в ячейках С69 по Н69 и С70 по Н70. Среднее давление для всего очага деформации p_c рассчитывается в ячейках С71 по Н71. Максимальное давление в очаге деформации p_m рассчитывается в ячейках С72 по Н72. Коэффициенты n_1 , n_2 и n_p вертикального напряжения (подпора) в зонах отставания, опережения и для всего очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках С73 по Н73, С74 по Н74 и С75 по Н75. Пределы текучести с учетом натяжения в начале и конце очага деформации соответственно рассчитываются в ячейках С76 по Н76 и С77 по Н77. Коэффициенты плеча равнодействующих в зонах отставания и опережения ψ_1 и ψ_2 соответственно рассчитываются в ячейках С78 по Н78 и С79 по Н79. Показатели сил трения в зонах отставания и опережения f_{c1} и f_{c2} соответственно рассчитываются в ячейках С80 по Н80 и С81 по Н81.

Длина дуги захвата l_c с учетом упругой деформации валков рассчитывается в ячейках К61 по Р61. Уточнённый радиус сплющивания валков R_c^l рассчитывается в ячейках К62 по Р62. Уточнённое положение

нейтрального сечения с учетом натяжения концов полосы $\left(\frac{\gamma}{\alpha_c}\right)^l$

рассчитывается в ячейках К64 по Р64. Опережение при прокатке S рассчитывается в ячейках К66 по Р66. Окружная скорость валков v_B рассчитывается в ячейках К68 по Р68. Уточнённая высота полосы в нейтральном сечении h_H рассчитывается в ячейках К69 по Р69. Уточнённая средняя высота полосы в зонах отставания и опережения h_{c1}^l и h_{c2}^l соответственно рассчитывается в ячейках К70 по К70 и К71 по Р71. Уточнённые длины дуг в зонах отставания и опережения l_1^l и l_2^l соответственно рассчитываются в ячейках К72 по К72 и К73 по Р73. Уточнённые значения коэффициентов, учитывающих характер распределения предела текучести в зонах отставания и опережения, для предварительно отожженного металла K_2^l и K_1^l соответственно рассчитываются в ячейках К74 по К74 и К75 по Р75. Уточнённые средние давления в зонах отставания и опережения p_1^l и p_2^l соответственно рассчитываются в ячейках К78 по К78 и К79 по Р79. Уточнённое среднее давление для всего очага деформации p_c^l рассчитывается в ячейках К80 по Р80. Уточнённое максимальное давление в очаге деформации p_M^l рассчитывается в ячейках К81 по Р81. Коэффициент плеча равнодействующей относительно вертикальной оси сплющенной дуги ψ_c рассчитывается в ячейках К82 по Р82. Коэффициент подпора для всего очага деформации n_p рассчитывается в ячейках К83 по Р83. Полное усилие металла на валки P рассчитывается в ячейках К84 по Р84. Коэффициент сплющивания валков l_{c_s} рассчитывается в ячейках К86 по Р86. Коэффициент плеча равнодействующей относительно вертикальной оси валков ψ рассчитывается в ячейках К88 по Р88. Момент, необходимый для деформации M_d рассчитывается в ячейках К89 по Р89. Мощность прокатки N_d рассчитывается в ячейках К90 по Р90. Коэффициент, равный отношению максимального давления в очаге деформации к среднему K_p рассчитывается в ячейках К92 по Р92.

В программе Microsoft Excel 2003 выполнен тестовый расчет параметров холодной прокатки жести на стане 1400 АО «АрселорМиттал Темиртау» толщиной 0,18 мм, шириной 850 мм из подката толщиной 2,4 мм.

В таблице 11.1 приведены результаты расчета основных параметров прокатки с двумя итерациями: в числителе – первое, в знаменателе – второе приближение.

Таблица 11.1 – Результаты тестового расчета параметров прокатки жести

Параметры прокатки на стане 1400	Клеть					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
Длина дуги захвата l_C^I , мм	$\frac{9,3}{9,34}$	$\frac{16,14}{16,15}$	$\frac{12,55}{12,5}$	$\frac{9,46}{9,45}$	$\frac{6,49}{6,48}$	$\frac{5,77}{5,76}$
Уточненный радиус сплющивания валков R_C^I , мм	$\frac{300,396}{300,4}$	$\frac{300,6689}{300,7}$	$\frac{301,0191}{301,02}$	$\frac{301,7016}{301,71}$	$\frac{303,1175}{303,14}$	$\frac{305,187}{305,24}$
Уточнённый угол захвата α_C^I	$\frac{1,774}{1,781}$	$\frac{3,075}{3,077}$	$\frac{2,389}{2,4}$	$\frac{1,796}{1,79}$	$\frac{1,227}{1,22}$	$\frac{1,084}{1,081}$
Уточненное положение нейтрального сечения с учетом натяжения концов полосы $(\gamma/\alpha_C)^I$	$\frac{0,872}{0,868}$	$\frac{0,3349}{0,334}$	$\frac{0,3591}{0,36}$	$\frac{0,4012}{0,401}$	$\frac{0,4255}{0,426}$	$\frac{0,4292}{0,4294}$
Опережение при прокатке S	$\frac{0,1037}{0,1039}$	$\frac{0,0779}{0,0782}$	$\frac{0,0934}{0,0938}$	$\frac{0,1118}{0,1123}$	$\frac{0,0876}{0,088}$	$\frac{0,1129}{0,1135}$
Окружная скорость валков v_B , м/с	$\frac{1,68}{1,67}$	$\frac{1,96}{1,94}$	$\frac{3,27}{3,25}$	$\frac{5,54}{5,51}$	$\frac{9,61}{9,57}$	$\frac{22,46}{22,45}$
Полное усилие металла на валки P_{II} , кН	$\frac{2618}{2636}$	$\frac{13254}{13267}$	$\frac{11374}{11380}$	$\frac{9567}{9570}$	$\frac{7055}{7057}$	$\frac{7360}{7357}$
Момент, необходимый для деформации M_D , кН*м	$\frac{12}{13}$	$\frac{230}{232}$	$\frac{138}{139}$	$\frac{81}{82}$	$\frac{35}{37}$	$\frac{31}{31,5}$
Мощность прокатки N_D , кВт	$\frac{66}{70}$	$\frac{1498}{1488}$	$\frac{1506}{1496}$	$\frac{1491}{1481}$	$\frac{1134}{1128}$	$\frac{2358}{2348}$
K_p	$\frac{0,105}{0,114}$	$\frac{1,037}{1,052}$	$\frac{1,066}{1,072}$	$\frac{1,118}{1,129}$	$\frac{1,136}{1,141}$	$\frac{1,141}{1,142}$

Из таблицы 11.1 видно, что разница результатов расчета в первом и втором приближениях не превышает 8%, что свидетельствует о работоспособности программы.

Программа необходима в качестве блока программы оптимизации режимов прокатки жести.

11.4 Математическая модель ресурса пластичности при холодной прокатке жести

Процесс разрушения металла при прокатке жести зависит от пластических характеристик, степени деформации и напряженного состояния. Всякий металл для данного напряженного состояния при деформировании обладает ресурсом пластичности, определяемым, как степень деформации металла до разрушения [2].

Правильно выбранными режимами прокатки возможно определенное улучшение поверхности металла за счет выкатки дефектов. Улучшение поверхности зависит от условий залегания дефектов, числа их на единицу площади, расположения и др. Изменение глубины залегания зависит от многих технологических факторов и в каждом конкретном случае неодинаково.

Ресурс пластичности прокатываемого металла с дефектами, и как следствие, выкатываемость этих дефектов можно определить аналитически и с помощью проведения экспериментов.

Процесс разрушения металла при холодной деформации является сложным, развивающимся во времени процессом, наступление которого зависит от степени деформации и напряженного состояния. То есть всякий металл для данного напряженного состояния при деформировании обладает определенным ресурсом пластичности, определяемым как степень деформации металла до разрушения λ_p . При определении степени использования запаса пластичности принята величина [43]:

$$\Psi = \frac{\lambda}{\lambda_p}, \quad (11.109)$$

где λ - текущая деформация;

λ_p - величина деформации до разрушения.

Для монотонных циклических процессов деформации, к которым относится холодная прокатка жести за несколько проходов, при определении общей степени использования ресурса пластичности принята зависимость:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Psi_i \quad (11.110)$$

где Ψ_i - величина использования запаса пластичности на i - этапе,

n - количество этапов деформации.

При определении λ_p принята методика, приведенная в [44]. Преимуществом данной методики является то, что определяющими здесь является один показатель напряженного состояния - отношение октаэдрического напряжения к сопротивлению деформации. В то же время как другие

методики предлагают зависимость λ_p от двух параметров напряженного состояния, одним из которых является коэффициент Лоде. В соответствии с выбранной методикой для сталей О8кп, О8пс, О8ю рассчитано уравнение:

$$\lambda_p = \lambda_{p0} e^{1.69 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_{cp}} + \frac{1}{3} \right)}, \quad (11.111)$$

где λ_{p0} - степень деформации до разрушения при одноосном растяжении;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, - главные нормальные напряжения;

σ_{cp} - сопротивление деформации.

Для условий холодной прокатки, с учетом известных допущений $\sigma_{cp} = \sigma_T, \sigma_1 = p_x, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = p_x - 1.15\sigma_m$ уравнение (11.111) можно записать:

$$\lambda_p = \lambda_{p0} e^{1.69 \left(\frac{2P_x - 1.15\sigma_T}{3\sigma_T} + \frac{1}{3} \right)}, \quad (11.112)$$

где P_x - нормальное контактное напряжение в очаге деформации;

σ_T - предел текучести металла.

Приняв допущение $p_x = p_{cp}, \sigma_T = \sigma_{T,cp}$ с учетом условия $n_\sigma = \frac{P_{cp}}{\sigma_{cp}}$,

получено упрощенное уравнение для расчета величины деформации до разрушения в зависимости от коэффициента напряженного состояния:

$$\lambda_p = \lambda_{p0} e^{0.565(2n_\sigma - 0.15)}. \quad (11.113)$$

Используя уравнения (11.112) и (11.113), можно теоретически рассчитать деформацию разрушения металла при прокатке жести. Для расчета критической деформации разрушения при прокатке полосы с дефектом необходимо дополнительно принять схему напряженного состояния полосы под поверхностным дефектом.

На поверхности металла с дефектом действуют растягивающие напряжения, которые и приводят к деформации слоев металла непосредственно под дефектом, в то время, как слои металла с противоположной стороны деформируются за счет сжимающих напряжений (p_x).

Таким образом, напряженное состояние по толщине полосы с поверхностным дефектом переменено. Если принять, что сжимающие напряжения изменяются от p до 0 , то используя условие пластичности $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta_{\sigma T}$ можно допустить следующее распределение напряжений по толщине полосы:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= p_x \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k, \\ \sigma_3 &= \sigma_1 - \beta \sigma_m \end{aligned} \right\}, \quad (11.114)$$

где h_i, δ_i - толщина полосы и глубина дефекта на стадии деформации;

a - расстояние от поверхности полосы без дефекта;

k - коэффициент, учитывающий влияние внешних зон;

β - коэффициент Лоде.

Коэффициент k введен в результате наблюдения за ходом разрушения металла при прокатке полосы с дефектом. Было отмечено, что дефекты одной исходной глубины, но разной ширины приводят к различной глубине начального поверхностного разрушения. На основании этого выдвинуто предположение о влиянии ширины дефекта на распределение напряжений по толщине полосы. После изменения глубины поверхностного разрушения дефектов разной исходной ширины приняты следующие значения k :

$$\begin{aligned} \text{для } \ell_g < 1.5h_0 & \quad k = \frac{\ell_g}{h}; \\ \text{для } \ell_g \geq 1.5h_0 & \quad k = 1.5. \end{aligned}$$

Коэффициент Лоде β также является переменной величиной и изменяется от 1 (непосредственно под дефектом) до 1,15 (с другой стороны полосы). Изменение коэффициента Лоде по толщине полосы по аналогии с зависимостью (11.114) можно описать уравнением:

$$\beta = 1 + 0.15 \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k. \quad (11.115)$$

Подставив зависимости (11.14) и (11.115) в уравнение (11.111), после преобразований получим уравнение для расчета критической деформации при прокатке полосы с дефектом в любой точке по толщине полосы:

$$\lambda_p^* = \lambda_{p0} e^{0.565 \left[\left(\frac{2p_x}{\sigma_t} - 0.15 \right) \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k \right]}. \quad (11.116)$$

Приняв упрощения $p_x = p_{cp}$, $\sigma_t = \sigma_{t,cp}$ уравнение (11.117) можно записать:

$$\lambda_p^* = \lambda_{p0} e^{0.565 \left[(2n_\sigma - 0.15) \left(1 - \frac{a}{h_i - \delta_i} \right)^k \right]}. \quad (11.117)$$

На основании изложенного может быть разработана методика по определению допустимых размеров дефектов подката для прокатки жести. Регламентирование качества подката имеет целью обеспечение бездефектной поверхности холоднокатаной полосы при данных исходных механических свойствах металла, технологии холодной прокатки, суммарного обжатия и включает в себя определение максимальных допустимых поверхностных дефектов для данных условий деформации.

Первоначально производится расчет параметров напряженного состояния (P_x , σ_T или n_σ) в каждой клетке стана по существующим технологическим режимам. После этого определяется интенсивность выкатывания поверхностных дефектов (J_δ) для данных напряженного состояния и микрогеометрии рабочих валков. Затем по глубине дефекта определяется величина деформации, необходимая для сглаживания дефекта ($\lambda_{\text{вык}}$), рассчитывается деформация разрушения для данных условий (λ_p^*) по уравнению (11.116) или (11.117) и находится величина использования ресурса пластичности на данной стадии трансформации дефекта (Ψ^*). При этом при расчете деформации поверхностного разрушения определяется по напряженному состоянию в точке, соответствующей величине

$C = \frac{a}{h_i - \delta_i} = 0.9$, при расчете сквозного разрушения расчет целесообразно

производить для $\frac{a}{h_i - \delta_i} = 0.5$.

После определения Ψ^* находится величина запаса ресурса пластичности $W = 1 - (\Psi^*)^n$, где коэффициент n зависит от степени изменения напряженного состояния деформации, которое в ряде случаев приводит к частичному "залечиванию" образовавшихся на первой стадии деформации микропор, то есть происходит частичное восстановление ресурса пластичности. Это имеет место, в частности, при смене одноосного растяжения кручением, сжатием или прокаткой. Для учета данного эффекта вводится коэффициент n - который обычно больше единицы. На основании опытных данных рассчитаны исходный (при одноосном растяжении) Ψ_1 и остаточный (при холодной прокатке) Ψ_2 .

После определения величины запаса ресурса пластичности (при $W > 0$) производится расчет деформации разрушения для данного напряженного состояния (λ_p) по уравнениям (11.113) или (11.114) и находится остаточная деформация металла до разрушения $\lambda_p^{\text{ост}} = W\lambda_p$, при соблюдении условия:

$$\alpha(\lambda_{\text{вык}} + \lambda_p^{\text{ост}}) > \lambda_\Sigma, \quad (11.118)$$

где λ_Σ - суммарное обжатие полосы при холодной прокатке;

α - коэффициент, определяющий величину допустимого уровня использования ресурса пластичности, данный поверхностный дефект допускается на подкате.

Коэффициент α выбирается из соображений необходимой равномерности механических свойств и особенностей технологии дальнейшей переработки холоднокатаной полосы.

Расчет по приведенному алгоритму организован в цикле, параметром которого является число проходов (реверсивного стана) или клетей (для станов непрерывной и бесконечной прокатки) и выполняется по ходу прокатки в последовательности, указанной на схеме стрелками. В прямоугольниках указаны формулы и выражения, по которым следует считать, либо присваивать то или иное значение данному выражению в том случае если выполняется, или не выполняется условие, написанное в ромбах.

Остановимся на узловых местах блок-схемы. За блоком ввода исходных данных следует блок, в котором находится значение коэффициента k , учитывающего влияние внешних зон, в зависимости от исходных значений толщины подката и ширины поверхностного дефекта на нем. После блока определения коэффициента k следует блок, с которого начинается цикл переходов по клетям стана, обусловленный количеством клетей стана или проходов на реверсивном стане. Следующим шагом определяются величина деформации (λ_i) и напряженное состояние металла в данной клетке ($n_{\sigma i}$). В следующем блоке, обозначенном ромбом, определяется наличие на полосе дефекта. Если на полосе дефекта нет (либо он уже выкатан в предыдущих клетях), то расчеты следует делать по стрелке «Да» - по правой колонке блок-схемы. При наличии дефекта, то есть $(\delta_1/h_1) \neq 0$ - следует считать по стрелке «Нет», где первым делом определяется критерий интенсивности сглаживания дефекта ($J_{\delta i}$) в месте дефекта. Следующим шагом является определение и сравнение текущей разницы отношения глубины дефекта $\Delta \frac{\delta_i}{h_i}$ к

предыдущему отношению глубины дефекта с текущей толщиной подката $\frac{\delta_{i-1}}{h_{i-1}}$. В случае если $\Delta \frac{\delta_i}{h_i}$ меньше или равно $\frac{\delta_{i-1}}{h_{i-1}}$, то дефект считается «невыкатанным» и расчеты делаются по стрелке «Нет» с определением отношений $\frac{\delta_i}{h_i}$ и $\frac{\delta_i}{h_i}_{cp}$. В случае выполнения условия в блоке сравнения,

расчеты выполняются по стрелке «Да», где $\frac{\delta_i}{h_i} = 0$, что говорит о том, что

дефект на полосе выкатан. Также определяется $\left(\frac{\delta_i}{h_i} \right)_{cp}$. После определения

средних отношений текущей глубины дефекта к текущей толщине дефекта, определяется степень деформации металла до разрушения в месте дефекта (λ_{pi}^*). Также необходимо посчитать степень деформации до разрушения

металла без дефекта (λ_{pi}), (находящегося с правой стороны алгоритма). Затем определяется степень использования ресурса пластичности в данном проходе в месте дефекта (Ψ_i^*) и без него (Ψ_i), далее вычисляются суммарные степени использования ресурса пластичности $\Psi_{\Sigma i}^*$, $\Psi_{\Sigma i}$ и суммарная величина деформации раската ($\lambda_{\Sigma i}$). Далее необходимо сравнить величину использования ресурса пластичности ($\Psi_{\Sigma i}^*$), (в случае, если дефект не выкатан и расчеты ведутся по левой колонке алгоритма) и если она больше или равна 1, то расчет идет по стрелке «Нет», где подсчитывается деформация разрушения (λ_{rp}^*), то есть данная деформация является окончательной. И если металл продолжать и дальше деформировать в следующих клетях, то это непременно приведет к разрушению металла в клетях. Если $\Psi_{\Sigma i}^* < 1$, то алгоритм возвращает расчеты к блоку сравнения $\frac{\delta_{i-1}}{h_{i-1}}$ при условии, что $i < n$. Если дефект не «выкатан», то блок сравнения отправляет по стрелке «Нет» и все расчеты вновь повторяются, если дефект «выкатан», то расчеты направляются по стрелке «Да». здесь определяется запас использования ресурса пластичности (W). Далее идут расчеты Ψ_i и $\Psi_{\Sigma i}$ без учета дефекта на поверхности раската для данного прохода и суммарная величина деформации раската в этом проходе $\lambda_{\Sigma i}$. Следующим этапом сравниваются значения $\Psi_{\Sigma i} < W$. В случае невыполнения неравенства расчет идет по стрелке «Нет», где вновь вычисляется степень деформации разрушения без наличия дефекта (λ_{rp}). В случае выполнения неравенства расчеты делаются по стрелке «Да», и если $J < i$ то необходимо вернуться к расчетам, начиная с вычисления текущей деформации разрушения (λ_{pi}) в очередном проходе и т.д. Когда $i = n$, то расчеты идут по стрелке «Да», где подсчитывается степень деформации разрушения, по которой можно судить, на сколько продеформировали полосу до начала разрушения. Последним подсчитывается коэффициент, определяющий величину допустимого уровня использования ресурса пластичности прокатываемой полосы (α), после чего ведется печать результатов, и на этом расчеты заканчиваются. Перечень идентификаторов, используемых в программе, приведен в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Идентификаторы, используемые в программе

Идентификаторы	Обозначения в тексте	Смысловое значение идентификаторов
1	2	3
N	n	Количество клеток
H(0)	h_0	Начальная толщина подката
H(I)	h_i	Текущая толщина подката
LAP0	λ_{p0}	Деформация разрушения при одноосном растяжении
C	C	Коэффициент
LAS(0)	$\lambda_{\Sigma 0}$	Суммарная деформация подката до прокатки
FSZ(0)	$\Psi_{\Sigma 0}^*$	Суммарный коэффициент использования ресурса пластичности на стадии выкатывания дефекта
FS(0)	$\Psi_{\Sigma 0}$	Суммарный коэффициент использования ресурса пластичности без учета дефекта
R(I)	R_{ai}^b	Шероховатость рабочих валков
P(I)	P_i^{cp}	Среднее контактное давление металла на рабочие валки
SM(I)	σ_i^{cp}	Средний предел текучести металла по клетям
DL	δ_0	Начальная глубина дефекта
K	K	Коэффициент, учитывающий влияние внешних зон
LA(I)	λ_i	Текущая деформация раската
NSM(I)	$n_{\sigma i}$	Напряженное состояние (коэффициент)
J(I)	$J_{\delta i}$	Критерий интенсивности сглаживания дефекта
D(I)	$\Delta \frac{\delta_i}{h_i}$	Отношение разности деформаций, необходимых для сглаживания дефектов
Y(I)	$\frac{\delta_i}{h_i}$	Текущая деформация при сглаживании дефектов
Q(I)	$\frac{\delta_i}{h_i}^{cp}$	Среднее отношение деформации при сглаживании дефектов
W	W	Запас ресурса пластичности
FS(I)	Ψ_i^*	Текущий коэффициент использования ресурса пластичности с учетом дефекта
F(I)	Ψ_i	Текущий коэффициент использования ресурса пластичности без дефекта
FSZ(I)	$\Psi_{\Sigma i}^*$	Текущий суммарный коэффициент использования ресурса пластичности с учетом дефекта
FZ(I)	$\Psi_{\Sigma i}$	Текущий суммарный коэффициент использования ресурса пластичности без дефекта

Продолжение таблицы 11.2

1	2	3
LAPZ(I)	λ_{pi}^*	Текущая деформация разрушения для данных условий с учетом наличия дефектов
LAP(I)	λ_{pi}	Текущая деформация разрушения для данных условий без учета дефекта
MZ	λ_{pp}^*	Деформация разрушения металла при прокатке полосы с поверхностным дефектом
M	λ_{pp}	Деформация разрушения металла при прокатке полосы без дефекта
AL	α	Коэффициент, определяющий величину допустимого уровня использования ресурса пластичности

Ниже представлены результаты расчета СИРП и выкатываемости дефектов в виде, выдаваемом программой. Расчет был произведен с использованием описанной программы на языке Бейсик. Для расчета использованы профили: 3,0-0,7 мм; 2,4-0,6 мм, шириной 1000 мм.

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .5

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 3

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ РАСКАТА ИСЧЕРПАН В КЛЕТИ N 4

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВИЛА- 1.267009

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .3

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.719428

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .8463789

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .2

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.521387

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5771773

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .1

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.521387

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ- .5771773

ПРОФИЛЬ 3,0-0,7 / 1000

ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .05

ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН

ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.521387

КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА
 ПЛАСТИЧНОСТИ- .5771773
 ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .3
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.610596
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА
 ПЛАСТИЧНОСТИ- .860734
 ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .2
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 2
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 1.610596
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА
 ПЛАСТИЧНОСТИ- .860734
 ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .1
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.520603
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА
 ПЛАСТИЧНОСТИ- .5499852
 ПРОФИЛЬ 2,4-0,6 / 1000
 ГЛУБИНА ДЕФЕКТА .05
 ДЕФЕКТ ВЫКАТАН В КЛЕТИ N 1
 РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ НЕ ИСЧЕРПАН
 ДЕФОРМАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СОСТАВЛЯЕТ- 2.520603
 КОЭФФИЦИЕНТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА
 ПЛАСТИЧНОСТИ- .5499852

Предлагаемую методику расчета можно использовать при обеспечении автоматического контроля качества поверхности подката для предотвращения порывов полосы из-за дефектов поверхности подката. При поступлении сигнала о глубине дефекта, производится расчет суммарной деформации полосы, при которой разрушение полосы по дефекту и определяется клеть предполагаемого разрушения. После чего, для предотвращения порыва, прокатка полосы с дефектом ведется до клетки предполагаемого разрушения, после чего дефектный участок пропускается через оставшиеся клетки без обжатия. При установке датчика дефектов поверхности перед стыкосварочным агрегатом в линии стана бесконечной прокатки целесообразным является расчет критических величин поверхностных дефектов для диапазона суммарных обжатий, используемых на данном стане холодной прокатки. При прохождении дефектного участка через датчик величина дефекта сравнивается с критическими значениями, при превышении дефекта критической величины дефект вырезается.

Другим важным назначением методики, соответствующей компьютерной программе является ее применение в процедуре оптимизации режимов обжатий при холодной прокатке жести на стане 1400.

12 Оптимизация режимов обжатий жести на стане 1400

12.1 Метод оптимизации

Критерием оптимизации является степень использования ресурса пластичности (СИРП) в клетях стана. При оптимальном распределении СИРП по клетям стана с увеличением итоговой пластичности уменьшаются порывы полосы в межклетевых промежутках и в целом повышается качество прокатываемой жести [30, 44].

При алгоритме выбора режима холодной прокатки жести возникает задача оптимизации многоэтапного процесса. Сущность оптимизации с математической точки зрения сводится к следующему: требуется найти такой режим (такую стратегию или такие функции управления процессом), чтобы при заданных энергетических, технологических, организационных и экономических ограничениях реализовать экстремум так называемой целевой функции: максимальную производительность или минимальную себестоимость, максимально высокое качество продукции или максимально возможную ритмичность производства и так далее. В нашем случае минимуму СИРП.

Для решения задач оптимизации широко применяют поисковые прямые методы математического программирования. Различают методы регулярного и случайного поисков. При регулярном поиске алгоритм очередного шага в процессе поиска экстремума полностью определяется результатами предыдущих шагов. К таким методам относятся методы покоординатного спуска, градиентный метод и его модификации, в частности, метод наискорейшего спуска, метод стохастической аппроксимации.

Одним из наиболее простых методов регулярного поиска, реализующим идею замены однократного решения сложной задачи многократным решением более простой, является метод Гаусса-Зейделя, основанный на последовательном переборе параметров управления, причем на каждом этапе перебора экстремум отыскивается по отдельному выбранному i -тому параметру при постоянных значениях остальных. Найденное оптимальное значение i -го параметра не меняется на следующих $(n-1)$ этапах поиска.

При случайном поиске в алгоритм решения задачи намеренно вводят случайности, что в ряде случаев значительно ускоряет поиск глобального экстремума.

Наиболее полно элементы случайности используют в ненаправленном случайном поиске. Реализуют ее следующим образом[27]. Строят последовательность $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ независимых случайных точек, принадлежащих множеству допустимых значений аргументов X_1, X_2, \dots, X_n . Вычисляют соответствующие значения целевой функции $F(\xi_1), F(\xi_2), \dots, F(\xi_n)$, из которых затем выбирают наименьшее: $F_{\min} = \min \{ F(\xi_1), F(\xi_2), \dots, F(\xi_n) \}$.

Здесь ограниченное подмножество вариантов выбирают случайным образом. Это позволяет более или менее равномерно просмотреть всё множество вариантов и гарантирует от какой-либо односторонней схемы выбора «пробных» вариантов. С увеличением числа рассматриваемых вариантов возрастает вероятность получения оптимального решения задачи. Метод позволяет статистически оценить число вариантов, необходимых для получения оптимального решения с заданной точностью.

Задачи оптимизации многоступенчатых процессов, то есть таких, которые естественным образом складываются из нескольких этапов, эффективно решаются методом динамического программирования. Его специфические особенности:

- задача решается по шагам или этапам: сложная задача сводится к последовательному решению множества более простых задач;
- на каждом этапе оптимизируется целевая функция с учетом условий, определяемых решениями, принятыми на предыдущих этапах;
- целевая функция должна обладать свойством адитивности, то есть должно быть:

$$F = \sum_i^N f_i, \quad (12.1)$$

где f_i - вклад в целевую функцию i -го этапа ($i = 1, 2, \dots, N$).

Метод динамического программирования позволяет отказаться от сплошного перебора и ограничиться целенаправленным перебором резко сокращенного количества вариантов, что существенно снижает трудоемкость расчетов. Другое важное достоинство метода: он легко и просто учитывает ограничения, накладываемые на решение. В то время, как при использовании традиционных методов оптимизации увеличение количества ограничений существенно усложняет задачу, при динамическом программировании, наоборот, чем больше ограничений и, следовательно, чем уже область допустимых решений, тем меньше вариантов приходится рассматривать и тем скорее достигается оптимальное решение.

Целесообразно использовать метод ненаправленного случайного поиска, так как он достаточно прост, обеспечивает высокую точность нахождения оптимального решения.

Поясним его сущность на следующем примере. Пусть применительно к прокатке жести на N -клетевом непрерывном стане требуется найти режим прокатки, обеспечивающий равенство СИРП $\psi_1, \psi_2 \dots \psi_N$ в отдельных клетях. Допустим, что начальная h_0 и конечная h_N толщины прокатываемой полосы заданы и, следовательно, известно суммарное обжатие $h = h_0 - h_n$. Искомое обжатие в отдельных клетях обозначим через $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$.

Целевую функцию этой задачи можно сформулировать в виде:
 $F = (\psi_{\Sigma 1} - \psi_{\Sigma 2})^2 + (\psi_{\Sigma 2} - \psi_{\Sigma 3})^2 + \dots + (\psi_{\Sigma N-1} - \psi_{\Sigma N})^2 \rightarrow \min$ при условии

$\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_n = \Delta h$. и прочих ограничениях, накладываемых прочностными возможностями стана, энергетическими возможностями привода и так далее.

После предварительного назначения натяжений в межклетевых промежутках расчет по данному методу сводится к следующему:

- назначают некоторое обжатие Δh_1 в первой клетки и определяют соответствующую степень использования ресурса пластичности ψ_1 .

- подбирают такое обжатие Δh_2 во второй клетки, при котором $\psi_2 = \psi_1$;

- подбирают такое обжатие Δh_N , при котором $\psi_{\Sigma N} = \psi_{\Sigma N-1}$;

- на каждом этапе проверяют, удовлетворяет ли принятое обжатие системе ограничений; если на i -том этапе принятое обжатие не «проходит» по какому-либо ограничению, то уменьшают Δh_1 и повторяют расчеты, начиная с этапа 1;

- когда пройдены все N этапов, определяют сумму $\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_n = \Delta h$.; если $\Delta h > \Delta h_0 - \Delta h_N$, то уменьшают Δh_1 и повторяют расчеты, начиная с этапа 1; если $\Delta h > \Delta h_0 - \Delta h_1$, то увеличение обжатий невозможно, задача при заданной толщине Δh_N решения не имеет; если $\Delta h = \Delta h_0 - \Delta h_N$, то задача решена.

12.2 Компьютерная программа оптимизации режимов обжатий

Программа составлена в табличном процессоре Microsoft Excel 2003 и является продолжением программы для расчёта параметров прокатки. В ячейках С4 и I6 задаются начальная h_0 и конечная h_k толщина металла для сравнения с расчётными, если условие получения конечной толщины металла не выполняется, то расчёт дальше не ведётся. Уточнённый угол захвата α_c^l рассчитывается в ячейках K63 по P63. В ячейке Q63 задаётся допустимый угол захвата $[\alpha]$, если уточнённый угол захвата α_c^l больше, чем допустимый $[\alpha]$, то расчёт дальше не ведётся. СИРП рассчитывается в ячейках K84 по P84. В ячейках K85 по P85 задаётся допустимое значение СИРП, если вычисленное значение СИРП больше, чем допустимое, то расчёт дальше не ведётся. Момент, необходимый для деформации M_d рассчитывается в ячейках K89 по P89. В ячейках K94 по P94 задаётся допустимое момент $[M_d]$, если момент, необходимый для деформации, M_d больше, чем допустимый $[M_d]$, то расчёт дальше не ведётся. Мощность прокатки N_d рассчитывается в ячейках K90 по P90. В ячейках K91 по P91 задаётся допустимая мощность двигателя $[N_d]$, если мощность прокатки N_d больше, чем допустимая $[N_d]$, то расчёт дальше не ведётся. При выполнении всех вышеперечисленных ограничений в ячейке K96 рассчитывается критерий СИРП. После расчёта множества СИРП, они сравниваются между собой, и выбирается минимальное. Соответствующие минимальному значению СИРП режимы обжатий принимаются за оптимальные.

12.3 Оптимизация режимов прокатки жести на стане 1400

Оптимизация режимов прокатки жести осуществлена применительно к стану 1400 АО «АрселорМиттал Темиртау». Оптимизированы режимы прокатки трёх профилей: с исходной и конечной толщиной соответственно 2,4 мм и 0,18 мм; 2,4 мм и 0,2 мм; 2,4 мм и 0,22 мм; ширина 855 мм.

Принята система ограничений по размерам профилей, допустимому углу захвата, допустимому усилию металла на валки, допустимому моменту, необходимому для деформации, и допустимой мощности прокатки (таблица 12.1).

Таблица 12.1 – Система ограничений

Допустимые параметры прокатки на стане 1400	Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3	Клеть №4	Клеть №5	Клеть №6
Допустимый угол захвата, $[\alpha]$, град	5	5	5	5	5	5
Допустимое усилие металла на валки $[P_D]$, кН	19600	19600	19600	19600	19600	19600
Допустимый момент, необходимый для деформации $[M_D]$, кН*м	90	340	240	165	100	85
Допустимая мощность прокатки N_D , кВт	4000	6000	8000	8000	8000	8000
Допустимая величина СИРП	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

В процессе оптимизации методом случайного поиска для каждого профилеразмера жести компьютер перебрал не менее 700 вариантов режимов прокатки, каждый из которых проверен на предмет соответствия системе ограничений. В таблицах 12.2, 12.3, 12.4 представлены по десять удовлетворяющих всем условиям режимов обжатый и значения критерия оптимизации. В таблице 12.5 представлены цеховые режимы обжатый профилей и соответствующие им значения критерия оптимизации.

Таблица 12.2 – Результаты оптимизации режимов прокатки на стане 1400 жести толщиной 0,18 мм из подката толщиной 2,4 мм

Исходная и конечная толщина	Вариант режима	Клеть №1		Клеть №2		Клеть №3		Клеть №4		Клеть №5		Клеть №6		Критерий оптимизации СИРП
		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		
		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2,4-0,18	1	0,31	13	0,84	40	0,51	41	0,31	42	0,14	33	0,11	37,6	0,748
	2	0,28	11,8	0,72	34	0,62	44,1	0,34	44,1	0,15	34	0,11	38,6	0,668
	3	0,29	11,9	0,85	40,2	0,52	41,3	0,31	42	0,14	32,6	0,11	38,6	0,673
	4	0,31	13	0,85	40,7	0,52	41,9	0,29	41	0,16	37	0,09	33	0,970
	5	0,29	12,1	0,84	40	0,53	42	0,31	42	0,15	36	0,09	34,5	0,636
	6	0,28	11,8	0,72	34	0,6	43,1	0,35	44,1	0,16	35	0,11	38,6	0,599
	7	0,29	12	0,76	35,8	0,58	42,5	0,33	42,6	0,16	35,1	0,11	38,6	0,773
	8	0,31	13	0,79	38	0,53	41	0,31	41	0,16	35	0,11	38,6	0,718
	9	0,3	12,7	0,85	40,5	0,5	40	0,3	40	0,16	36	0,11	37,4	0,841
	10	0,31	12,8	0,8	38	0,54	42	0,29	38,8	0,17	37	0,11	38	0,629

Таблица 12.3 – Результаты оптимизации режимов прокатки на стане 1400 жести толщиной 0,20 мм из подката толщиной 2,4 мм

Исходная и конечная толщина	Вариант режима	Клеть №1		Клеть №2		Клеть №3		Клеть №4		Клеть №5		Клеть №6		Критерий оптимизации СИРП
		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		
		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2,4-0,2	1	0,28	11,8	0,8	38	0,52	40	0,3	38,2	0,17	35	0,12	37	0,907

Продолжение таблицы 12.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2	0,29	12	0,8	38	0,5	38	0,31	38	0,19	38	0,11	36	0,842
	3	0,34	14	0,76	37	0,49	38	0,3	37	0,19	37	0,12	37	0,647
	4	0,3	12,5	0,76	36	0,54	40	0,31	39	0,18	36	0,11	36,5	0,732
	5	0,3	12,6	0,78	37	0,53	40	0,29	37	0,18	37	0,11	36,4	0,698
	6	0,29	11,9	0,85	40	0,51	40	0,27	36	0,17	35,7	0,11	36,4	0,628
	7	0,33	13,6	0,81	39	0,49	39	0,28	36,2	0,17	35,2	0,12	37	0,692
	8	0,3	12,3	0,82	39	0,51	40	0,28	36	0,18	36	0,12	36,7	0,651
	9	0,29	12,2	0,8	38	0,52	39,6	0,31	38,8	0,17	36	0,11	35,3	0,681
	10	0,32	13,4	0,83	40	0,49	39,3	0,28	37	0,17	35	0,11	35,3	0,778

Таблица 12.4 – Результаты оптимизации режимов прокатки на стане 1400 жести толщиной 0,22 мм из подката толщиной 2,4 мм

Исходная и конечная толщина	Вариант режима	Клеть №1		Клеть №2		Клеть №3		Клеть №4		Клеть №5		Клеть №6		Критерий оптимизации
		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		
мм		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	СИРП
2,4-0,22	1	0,28	11,8	0,8	38	0,54	41	0,29	37	0,15	30,3	0,12	35,2	0,754
	2	0,29	12,2	0,8	38	0,5	38	0,31	38	0,16	32,3	0,12	34,8	0,800
	3	0,3	12,7	0,8	38	0,51	39	0,29	36	0,17	34,3	0,11	33,3	0,928
	4	0,3	12,7	0,78	37	0,5	38	0,3	37	0,19	36	0,11	32,6	0,812
	5	0,31	12,8	0,73	35	0,54	40	0,3	36,3	0,19	35,7	0,11	33,5	0,616
	6	0,29	12,1	0,8	38	0,52	40	0,28	35,8	0,17	34,2	0,11	33,2	0,681
	7	0,29	11,9	0,8	38	0,52	40	0,28	36,2	0,17	34,1	0,11	33	0,671
	8	0,3	12,4	0,8	38	0,53	41	0,28	36	0,17	34	0,1	31,9	0,641
	9	0,3	12,4	0,8	38	0,53	41	0,28	36	0,17	34,8	0,1	31,1	0,682
	10	0,31	13,1	0,83	40	0,51	41	0,27	36,9	0,15	32	0,1	30,3	0,798

Таблица 12.5 – Цеховые режимы обжатий и СИРП

Исходная и конечная толщина	Клеть №1		Клеть №2		Клеть №3		Клеть №4		Клеть №5		Клеть №6		Критерий оптимизи- зации СИРП
	обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		обжатие		
мм	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	
2,4-0,18	0,29	12	0,86	41	0,53	42	0,29	41	0,14	32,6	0,11	38	0,630
2,4-0,2	0,26	11	0,85	40	0,53	41	0,3	40	0,14	31	0,12	37	0,688
2,4-0,22	0,24	10	0,86	40	0,52	40	0,3	38	0,14	30	0,12	35,3	0,666

Для профиля с толщиной 0,18 мм минимальному критерию оптимизации отвечает вариант режима обжатий 6, значение критерия оптимизации $\psi_{opt}=0,599$, для цехового режима $\psi_{цех}=0,630$. Так как $\psi_{opt} < \psi_{цех}$, то оптимальный режим обжатий следует считать более эффективным цехового режима.

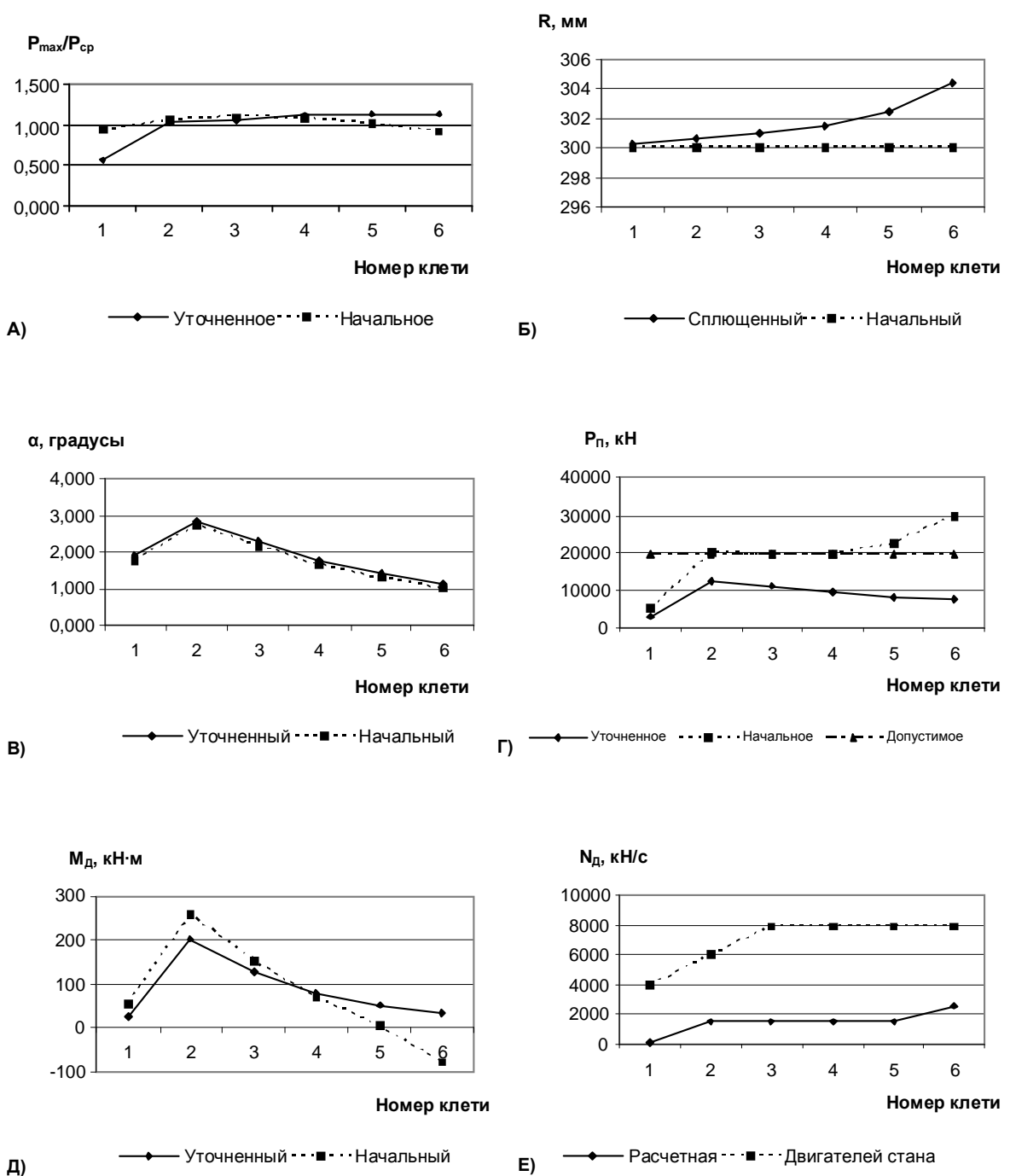
Для профиля толщиной 0,2 мм минимальному критерию оптимизации отвечает вариант режима обжатий 3, критерий оптимизации $\psi_{opt}=0,647$ для цехового режима $\psi_{цех}=0,688$.

Для профиля толщиной 0,22 мм минимальный критерий оптимизации имеет режима обжатий 5, критерий оптимизации $\psi_{opt}=0,616$, для цехового режима $\psi_{цех}=0,666$.

Таким образом, для всех профилей значения СИРП, полученные при оптимизации, меньше значений СИРП, соответствующих цеховым режимам.

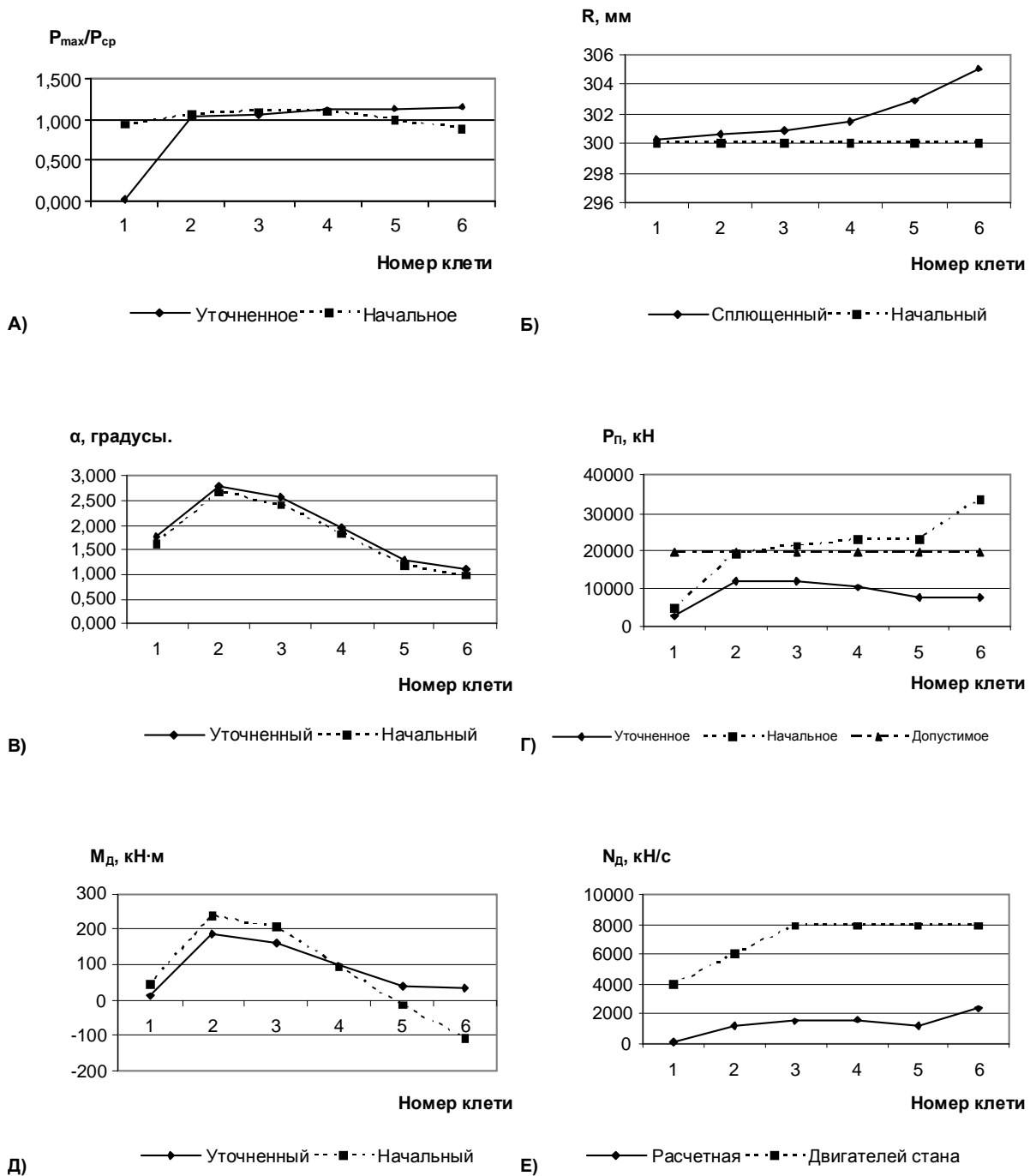
Графики изменения параметров прокатки жести толщиной 0,18 мм, 0,2 мм и 0,22 мм на стане 1400 по оптимальным режимам приведены на рисунках 12.1-12.3.

Оптимальные режимы, по сравнению с цеховыми режимами, для всех рассмотренных случаев характеризуются меньшими значениями критерия оптимизации – СИРП, а следовательно, большим запасом пластичности металла. Это обеспечивает меньшую вероятность обрывов полос в межклетевых промежутках стана 1400, лучшую выкатываемость поверхностных дефектов, а следовательно, повышение качества жести, производимой из непрерывнолитого металла. Кроме того, уменьшаются аварийные простои стана, в меньшей мере травмируются прокатные валки.



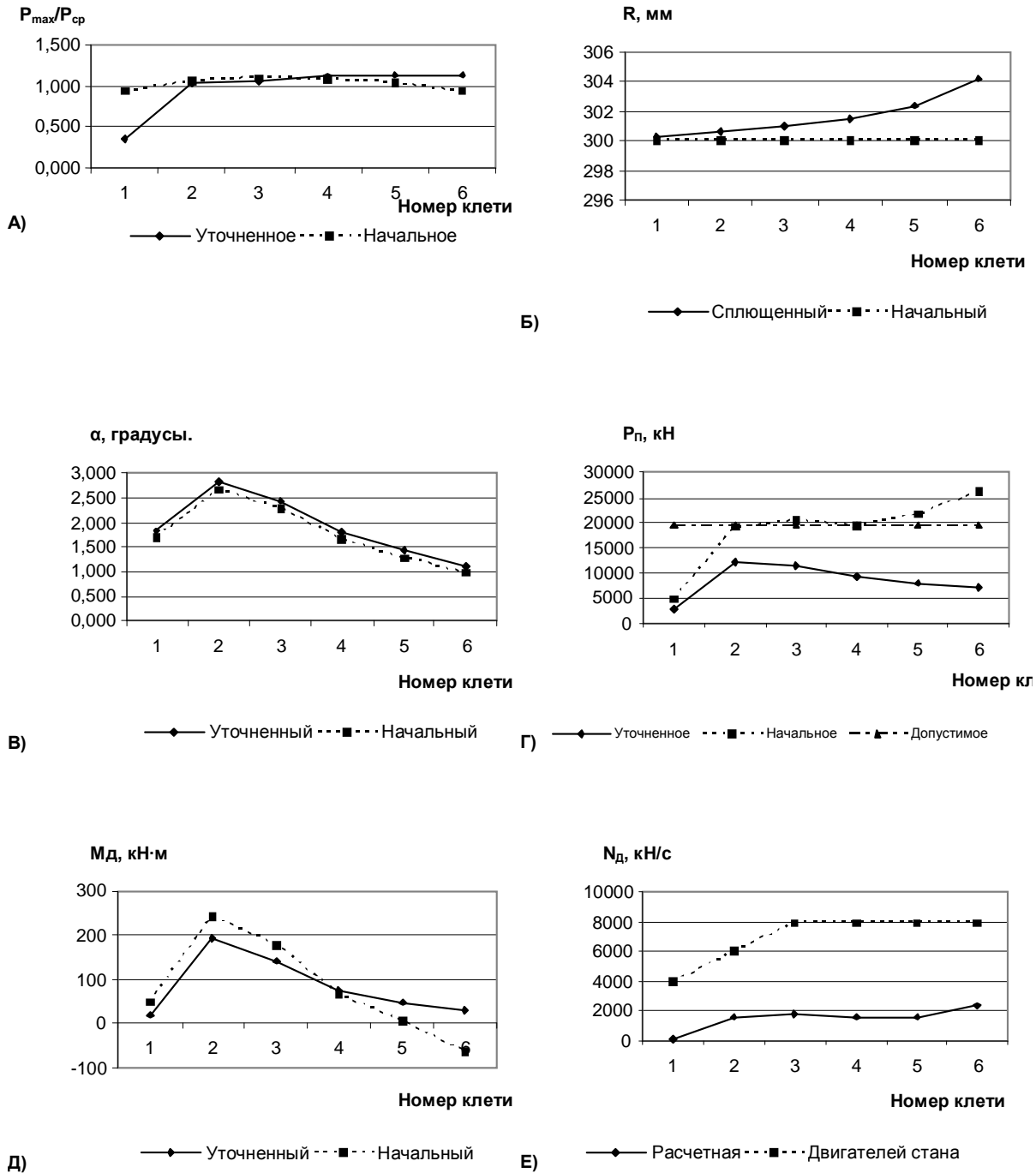
А) – Отношение максимального давления в очаге деформации к среднему;
 Б) – радиус вала; В) – угол захвата; Г) – полное давление металла на валки;
 Д) – момент, необходимый для деформации; Е) – мощность прокатки.

Рисунок 12.1 – Графики параметров прокатки оптимизированных режимов обжатий для профиля с исходной и конечной толщиной соответственно 2,4 мм и 0,20 мм



А) – Отношение максимального давления в очаге деформации к среднему;
 Б) – радиус вала; В) – угол захвата; Г) – полное давление металла на валки;
 Д) – момент, необходимый для деформации; Е) – мощность прокатки.

Рисунок 12.2 – Графики параметров прокатки оптимизированных режимов обжатий для профиля с исходной и конечной толщиной соответственно 2,4 мм и 0,18 мм



А) – Отношение максимального давления в очаге деформации к среднему;
 Б) – радиус вала; В) – угол захвата; Г) – полное давление металла на валки;
 Д) – момент, необходимый для деформации; Е) – мощность прокатки.

Рисунок 12.3 – Графики параметров прокатки оптимизированных режимов обжатий для профиля с исходной и конечной толщиной соответственно 2,4 мм и 0,22 мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная монография посвящена основным вопросам моделирования свойств металла при прокатке на листовых станах. Рассмотрены вопросы, связанные с технологией производства на АО «АрселорМиттал Темиртау» непрерывнолитых слябов, горяче- и холоднокатаных листов; анализом показателей пластичности; теорией прочности; исследованием свойств слябов, листов; условиями деформирования слябов на широкополосном стане 1700; математическим моделированием этого процесса.

Подробно изложены методики математического моделирования ресурса пластичности металла при горячей и холодной прокатке; представлены алгоритмы квалиметрической оценки качества прокатанного листа.

Особое внимание уделено методикам по определению технологических параметров прокатки горяче- и холоднокатаных листов, представлены блок-схемы соответствующих программ для расчета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Непрерывная разливка стали на радиальных МНЛЗ. Сладкоштитев В.Т., Потанин Р.В., Сумадзе О.Н., Рутес В.С. – М.: Металлургия, 1974 – 288с.
- 2 Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. 2-е из., перераб. и доп. Екатеринбург: изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001 836 с.
- 3 Физическое металловедение: учебник для вузов/ С.В. Грачев, В.Р. Базар, А.А. Богатов, В.П. Швейкин. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. 534 с.
- 4 Шишкин Ю.И., Егорова Т.Г., Вертунцов К.Ю. Оценка качества внутренней структуры литой заготовки из низкоуглеродистой стали // Технология производства металлов и вторичных материалов. Республиканский научный журнал. – Темиртау: РГП КГИУ. – 2009. - №1 (15). – С. 36-39.
- 5 Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. - М: Мир. 2003. 528 с.
- 6 Парашин В.М., Чертов А.Д. Управление качеством непрерывнолитой заготовки. Сталь, 2005. №2. с. 37-43.
- 7 Носоченко О.В., Рыхов Ю.И., Дюдкин ДА. и др. Освоение МНЛЗ в конвертерном цехе завода «Азовсталь». Сталь, 1980. №4. с. 279-281.
- 8 Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб пособие для ВТУЗов. М.:Высшая школа, 1988. – 239 с.
- 9 Справочник прокатчика. Коновалов Ю.В., Налча Г. С. Металлургия 1977. 312 с.
- 10 Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. -М.: Металлургия, 1986. -430 с.
- 11 Теория прокатки. Справочник. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
- 12 Жадан В.Т., Маневич В.А. Совершенствование технологии прокатки на основе комплексных критериев качества. – М.: Металлургия, 1989. –96 с.
- 13 Мигачев Б.А., Найзабеков А.Б. Элементы квалиметрии в техническом приложении. – Алматы: Издание РИК по УиМ, 2001. – 125 с.
- 14 Мигачев Б.А. К вопросу определения интегральных показателей в задачах квалиметрии// Дефектоскопия. 1999. № 8. С. 67.
- 15 Азгальдов Г.Г. Общие сведения о методологии квалиметрии // Стандарты и качество. - 1994. - № 11. С. 24.
- 16 Квалиметрия в обработке металлов давлением (учебной пособие)/ Найзабеков А.Б., Талмазан В.А., Шмид Н.Ю. – Алматы, РИК по УМЛ. 2002, 142 с.
- 17 Ноговицын А.В. К решению плоской задачи течения металла при горячей прокатке. //Теория и практика производства широкополосной стали. – М.: Металлургия. –1978. №3. С.90-97.
- 18 Ноговицын А.В. Исследование неравномерности деформации полосы при прокатке в последней клетки непрерывного широкополосного стана. // Прокатка широкополосной стали. –М.: Металлургия. 1985. С.41-43.

- 19 Ноговицын А.В. Применение биполярной системы координат для исследования очага деформации при плоской прокатке. //Повышение качества тонколистовой стали: Сб. научных тр. –М.: Металлургия. 1986. С. 90-97.
- 20 Ноговицын А.В. Исследование кинематических параметров контактного взаимодействия металла и вала при прокатке с помощью математической модели вязкопластического течения. //Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. №12. С.63-68.
- 21 Ноговицын А.В. Влияние кинематических граничных условий на напряженно-деформированное состояние при плоской прокатке. //Известия вузов. Черная металлургия. –1989. -№7. – С.50-55.
- 22 Капланов Г.И. Определение нормальных контактных напряжений при двухмерной прокатке. //Самолетостроение и техника воздушного флага: Сб. научных тр. Харьковского государственного университета: - Харьков. –1965. вып. I. – С.80-86.
- 23 Капланов Г.И. Поле скоростей при двухмерной прокатке. //Самолетостроение и техника воздушного флага: Сб. научных тр. Харьковского государственного университета: - Харьков. –1966. вып. VI. С.102-106.
- 24 Капланов Г.И., Юхновский Ю.М. Деформированное состояние металла при прокатке тонких листов. //Обработка металлов давлением: Сб.тр. МЧМ СССР УкрНИИМеталлов. –М.: Металлургия. –1970. – вып. XVII. –С. 87-92.
- 25 Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. Теория прокатки. Справочник. –М.: Металлургия, 1982. –335 с.
- 26 Мигачев Б. А., Найзбеков А. Б. Планирование и реализация эксперимента (в задачах механики обработки металлов давлением; учебное пособие) – Алматы: РИК по УМЛ. 2006. -132 с.
- 27 Талмазан В.А. Холодная прокатка листа. Учебное пособие .–Алматы: РИК по УМЛ, 2004. – 100с.
- 28 Грудев А.П. Теория прокатки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Интермет Инженеринг, 2011. – 280с.
- 29 Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001 836 с.
- 30 Оптимизация прокатного производства // Скороходов А.Н., Полухин П.И., Илюкович Б.М., Хайкин Б.Е., Скороходов Н.Е. – М.: Металлургия. 1983. – 432 с.
- 31 Полухин П.И., Хензель А., Полухин В.П. Технология процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1988. – 408 с.
- 32 Виткин А.И., Галкин Д.П., Берлин Б.И.. Основы теории и технологии производства белой жести. - М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
- 33 Мировое производство жести в 1977 году // Berg und Hottenmann Monatsh. – 1978. – № 123. – С. 331-333.

- 34 Hoare W.E., Henges E.S., Barry V.T.K. The Technology of Tinplate. London // Edward Arnold Publishers. – 1985. – С. 420-422.
- 35 Виткин А.И., Гейндл И.И. Металлические покрытия листовой и полосовой стали. –М : Metallurgiya, 1977. – 196 с.
- 36 Ксензук Ф.А., Трощевков Н.А., Чекмарев А.П., Сафьян М.М. Прокатка автолистовой стали. –М.: Metallurgiya, 1989. – 29с.
- 37 Чекмарев А.П., Сафьян М.М. Определение оптимальной температуры смотки горячекатаных полос // Сталь. – 1985. – №11. – С. 32-33.
- 38 Коновалов Ю.В., Галкин Д.Н. Повышение точности листовой прокатки. – М.: Metallurgiya, 1988. – 296 с.
- 39 ГОСТ 13345-85. ЖЕСТЬ. Технические условия. - М.: Москва, Государственный комитет СССР по стандартам.
- 40 ГОСТ Р 52204-2004. ЖЕСТЬ ХОЛОДНОКАТАНАЯ ЧЕРНАЯ И БЕЛАЯ. Технические условия. - М.: Москва, ГОССТАНДАРТ РОССИИ.
- 41 Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалитметрии. – М.: Изд-во Стандартов, 1973. – 170с.
- 42 Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства. –М.: Metallurgiya, 1994. -656 с.
- 43 Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов: Учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
- 44 Скороходов В.М., Бармин Г.Ю., Чернов П.П. Выкатываемость дефектов поверхности при холодной прокатке и качество полосы. Сталь, 1991, №5, с. 45-48.

**Найзабеков Абдрахман Батырбекович
Талмазан Виталий Антонович
Кривцова Ольга Николаевна
Лежнев Сергей Николаевич
Сивякова Галина Александровна
Панин Евгений Александрович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ НА
ЛИСТОВЫХ СТАНАХ**

Монография. – Темиртау: КГИУ, 2014. – 273 с.

Подписано к печати 03.12.2014 года. Формат 60×60 1/16

Усл. печ. л. 17.

Тираж 500. заказ № 120