

В. С. Зайцев

**АЛГОРИТМЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ
ЛИСТОПРОКАТНЫХ ЦЕХОВ**

3-е издание

*Допущено учебно-методическим объединением по образованию
в области металлургии в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 621.771.23
ББК 34.621
3-17

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра пластической деформации специальных сплавов Московского института стали и сплавов (технологического университета), заведующий кафедрой д-р техн. наук,
проф. *А. В. Зиновьев*;
д-р техн. наук, проф. *Р. Л. Шаталов*
(Московский государственный открытый университет)

Зайцев, В. С.

3-17 Алгоритмы проектирования параметров и режимов работы оборудования листопрокатных цехов : учебное пособие / В. С. Зайцев. – 3-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 704 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0555-3

Предложены алгоритмы и даны примеры проектирования на заданную программу параметров станов и агрегатов листопрокатных цехов основных типов, а также режимов обработки металла на станах и агрегатах известных параметров. Изложены подходы к экономическому обоснованию проектных решений и эскизному проектированию оборудования главной линии листопрокатной клетки.

Для студентов, аспирантов и преподавателей металлургических и машиностроительных направлений подготовки, а также специалистов металлургических фирм.

УДК 621.771.23
ББК 34.621

ISBN 978-5-9729-0555-3

© Зайцев В. С., 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список алгоритмов.....	6
Предисловие	8
1. Прокатное производство как объект проектирования.....	11
1.1 Общая характеристика прокатного производства	11
1.1.1. Технический уровень и качество продукции.....	11
1.1.2. Листовой прокат	13
1.1.3. Прокатный цех как производственная система.....	17
1.1.4. Движение и потери металла в прокатном цехе	21
1.1.5. Время работы, производительность и пропускная способность оборудования	29
1.2. Некоторые вопросы теории прокатки и теории машин.....	34
1.2.1. Температура металла при горячей прокатке.....	34
1.2.2. Сопротивление металла деформации	37
1.2.3. Цикл работы и пропускная способность оборудования	39
1.2.4. Возможности электродвигателей.....	43
1.2.5. Изменение скорости, мощности и крутящего момента в кинематической линии машины.....	47
1.2.6. Нагрузки в прокатных клетях и связанные с ними явления.....	53
1.2.7. Тахограмма, нагрузочная диаграмма и их использование для расчёта пропускной способности машины	61
1.2.8. Допускаемые режимы прокатки и допускаемые нагрузки.....	67
1.2.9. Распределение обжатий при прокатке.....	74
1.3. Задачи проектирования прокатных цехов, прокатного оборудования и технологии прокатки	82
1.3.1. Сортамент, состав и загрузка оборудования цеха.....	82
1.3.2. Постановка задачи проектирования оборудования. Выбор параметров технического уровня и расчётных профилей.....	91
1.3.3. Размеры валков	94
1.3.4. Расчёт предельных свободных режимов и пропускной способности обрабатывающих машин.....	97
1.3.5. Совместное проектирование параметров главных приводов и свободных режимов работы машин.....	102
1.3.6. Проектирование параметров машин, работающих в регламентированных либо связанных режимах	109
1.3.7. Картина скоростей в непрерывных станах и группах клетей	113
1.3.8. Моталки и размотыватели.....	116
1.3.9. Склады металла.....	122
1.3.10. Замечания о планировке цеха при учебном проектировании	131
2. Толстолистовые реверсивные станы.....	135
2.1. Характеристика оборудования и технологии толстолистовой реверсивной прокатки	135

2.1.1. Область применения и параметры станов.....	135
2.1.2. Особенности технологии	140
2.2. Одноклетевые станы	148
2.2.1. Проектирование параметров стана	148
2.2.2. Фабрикация слябов.....	167
2.2.3. Расчёт режимов контролируемой и традиционной прокатки	173
2.2.4. Параметры прокатки в клетях с вертикальными валками	206
2.2.5. Термическая обработка и отделка листа	209
2.3. Двухклетевые станы.....	217
2.3.1. Проектирование параметров	217
2.3.2. Расчёт режимов прокатки	222
3. Широкополосные станы горячей прокатки.....	245
3.1. Современное состояние	245
3.2. Проектирование параметров оборудования	254
3.2.1. Чистовая группа.....	257
3.2.2. Уборочная группа	273
3.2.3. Черновая группа.....	282
3.3. Расчёт режимов прокатки	298
3.3.1. Чистовая группа.....	298
3.3.2. Черновая группа.....	332
4. Станы холодной прокатки.....	359
4.1. Непрерывные станы	356
4.1.1. Проектирование параметров стана	359
4.1.2. Расчёт режимов прокатки	379
4.1.3. Особенности расчётов для жестепрокатных станов	410
4.2. Реверсивные станы	435
4.2.1. Проектирование параметров стана	438
4.2.2. Расчёт режимов прокатки	447
4.2.3. Особенности расчётов для двухклетевых реверсивных станов	468
4.3. Дрессировочные станы	472
5. Другие станы и агрегаты.....	487
5.1. Станы Стеккеля	487
5.1.1. Черновая клеть	488
5.1.2. Чистовая клеть	495
5.2. Прокатные группы литейно-прокатных агрегатов	520
5.2.1. Расчёт параметров группы.....	522
5.2.2. Расчёт режима прокатки	530
5.3. Методические нагревательные печи	545
5.3.1. Теория расчёта параметров печей и режимов нагрева	546
5.3.2. Проектирование параметров печей для широкополосного стана	552
5.3.3. Проектирование режимов нагрева слябов	555
5.3.4. Печи для толстолистовых станов.....	560
5.4. Отделение отжига рулонов в колпаковых печах.....	563

5.5. Агрегаты непрерывной подготовки и отделки металла	570
5.5.1. Непрерывные травильные агрегаты.....	570
5.5.2. Агрегаты непрерывного отжига и нанесения постоянных покрытий	576
5.5.3. Агрегаты продольной и поперечной резки	583
6. Экономическая оценка проектных решений	601
6.1. Срок эксплуатации, продолжительность строительства, капитальные вложения и штаты персонала	601
6.2. Затраты ресурсов и услуг и себестоимость продукции	603
6.2.1. Калькуляция себестоимости проката.....	603
6.2.2. Сортовые калькуляции	610
6.3. Экономическая эффективность проекта	611
6.3.1. Окупаемость капитальных вложений в новый цех	611
6.3.2. Эффективность модернизации действующего цеха	614
6.3.3. Сравнительная эффективность капитальных вложений.....	616
6.4. Алгоритмы экономической оценки учебных проектов	618
 ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Расчёт и конструирование главной линии прокатной клетки	634
A1. Исходные данные	635
A1.1. Основные параметры и размеры	635
A1.2. Производственная программа и режимы работы клетки Расчётные нагрузки	637
A1.3. Картина частот вращения валов, крутящих моментов кинематической линии клетки	640
A2. Проектирование клетки	641
A2.1. Узел валков	642
A2.2. Устройства для установки валков	653
A2.3. Узел станин.....	660
A2.4. Установка клетки	664
A2.5. Напряжения в деталях клетки и их деформации	664
A2.6. Нагрузки, допускаемые клетью.....	669
A3. Проектирование главного привода клетки	670
A3.1. Шпиндельное соединение.....	670
A3.2. Сдвоенный редуктор и шестерённая клеть	675
A3.3. Зубчатые муфты.....	682
A3.4. Главные двигатели.....	684
A4. Установка линии	685
A4.1. Общая компоновка.....	685
A4.2. Исследование динамических характеристик линии.....	689
A5. Список обозначений, использованных в Приложении	694
 СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	696

СПИСОК АЛГОРИТМОВ

1. Загрузка оборудования цеха производственной программой	85
2. Определение пропускной способности машины при свободных режимах работы	99
3. Совместное проектирование параметров и свободных режимов работы машины	106
4. Проектирование складов металла.....	126
5. Проектирование одноклетевого толстолистого стана.....	154
Применение <i>алгоритма 5</i> для проектирования параметров черновой клетки стана Стеккеля.....	488
6. Фабрикация слябов для толстолистого стана.....	169
7. Проектирование режима для одноклетевого стана на примере низкотемпературной контролируемой прокатки	174
Применение <i>алгоритма 7</i> для проектирования режима традиционной прокатки на одноклетевом стане.....	197
Применение <i>алгоритма 7</i> для проектирования режима прокатки в черновой клетки стана Стеккеля.....	489
8. Расчёт мощности двигателя и параметров прокатки в клетке с вертикальными вальками	207
9. Проектирование параметров оборудования и режимов горячей правки, охлаждения и термической обработки толстого листа	211
10. Проектирование толстолистого двухклетевого стана	219
11. Проектирование режима высокотемпературной контролируемой прокатки на двухклетевом стане	222
12. Проектирование параметров чистовой группы ШСГП.....	261
13. Проектирование параметров отводящего рольганга и моталок	274
14. Проектирование параметров черновой группы ШСГП	287
15. Проектирование режимов прокатки в чистовой группе ШСГП.....	305
16. Проектирование режимов прокатки в черновой группе ШСГП	334
17. Проектирование параметров непрерывного стана холодной прокатки	363
Применение <i>алгоритма 17</i> для проектирования жестепрокатного стана	413
18. Проектирование режима для непрерывного стана холодной прокатки.....	385
Применение <i>алгоритма 18</i> для проектирования режима прокатки на жестепрокатном стане.....	425
19. Проектирование параметров одноклетевого реверсивного стана холодной прокатки	438
20. Проектирование режима прокатки на одноклетевом реверсивном стане.....	447
Применение <i>алгоритма 20</i> для двухклетевого реверсивного стана.....	468
21. Проектирование дрессировочного стана	473
22. Проектирование режима дрессировки	479
23. Проектирование параметров чистовой клетки и моталок стана Стеккеля.....	496

24. Проектирование режима прокатки в чистовой клетке стана Стеккеля	502
25. Проектирование непрерывной группы клеток ЛПК.....	522
26. Проектирование режима для прокатной группы ЛПК	530
27. Проектирование параметров нагревательных печей.....	552
28. Проектирование режимов нагрева слябов.....	555
29. Проектирование отделения колпаковых печей.....	566
30. Проектирование непрерывного травильного агрегата	572
31. Проектирование агрегата непрерывного отжига	577
Применение <i>алгоритма 31</i> для проектирования агрегата непрерывного горячего цинкования.....	580
32. Проектирование агрегата продольной резки толстых полос	584
Применение <i>алгоритма 32</i> для проектирования агрегата продольной резки тонких полос	593
33. Проектирование агрегата поперечной резки.....	595
34. Экономическая оценка проекта нового цеха.....	618
35. Экономическая оценка проектов модернизации цеха.....	627

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический прогресс в прокатном производстве предполагает непрерывное освоение новых видов продукции, а при необходимости и создание новых производственных мощностей. Ведущая роль в этом процессе принадлежит инженерам-проектировщикам прокатных цехов, прокатного оборудования и технологии прокатки. *Проектирование* – это процесс, заключающийся в многократном преобразовании начального описания объекта, содержащегося в задании на проектирование, в конечное, достаточное для его реализации. Соответственно *проект* – это комплекс документов, фиксирующий принятые проектные решения на разных стадиях разработки. Только завершающая стадия проекта принимается к исполнению, более ранние стадии содержат идеи, предложения и их обоснование, и в этом от них не должен отличаться учебный проект. Проектирование – высокоинтеллектуальный и дорогостоящий процесс: затраты на проектирование и авторское сопровождение промышленного строительства в передовых индустриальных странах достигают 14 – 16 % от полных капитальных вложений.

Технологическая часть проекта промышленного объекта определяет состав и параметры обрабатывающего оборудования, а проект технологии производства продукции – параметры режимов её обработки. Если состав оборудования прокатного цеха диктуется, главным образом, сортаментом, то параметры оборудования зависят от режимов обработки проката и поэтому достоверно могут быть определены только совместно с режимами. Выполнение технологической части проектов прокатных цехов, технологических заданий на разработку других частей проекта и прокатного оборудования, а также проектирование режимов прокатки как раз и составляет область собственно инженерной деятельности прокатчиков-технологов.

Книга даёт возможность даже начинающему специалисту рассчитать режимы обработки продукции на станах и агрегатах листопрокатных цехов, а также оценить необходимые параметры оборудования при его проектировании или закупке. Эти режимы и параметры не только приемлемы, но во многих случаях и оптимальны по тем или иным критериям. Однако решение инженерных задач никогда не бывает единственным и, следовательно, с помощью предлагаемых или иных методов могут быть найдены другие режимы и параметры, удовлетворяющие и этим, и не рассмотренным здесь критериям, возможно, более важным в каких-то обстоятельствах.

В книге, в общем, сохранены принципы, впервые сформулированные в учебнике [1], только в отличие от него большая часть результатов здесь достигается последовательными приближениями, что как раз отвечает содержащемуся в определении проектирования положению о многократном улучшении на каждом шаге ранее полученных решений.

Книга содержит большое количество обширных примеров, названных *алгоритмами*, перечень которых дан после оглавления. В большинстве это алгоритмы проектирования параметров станов, агрегатов, участков прокатных цехов и алгоритмы проектирования режимов обработки металла. Алгоритмы

первого вида предусматривают выбор показателей технического уровня объекта проектирования по аналогии с хорошо работающими или перспективными образцами и расчёт их параметров назначения, исходя из заданной производственной программы. Алгоритмы второго вида предполагают все параметры оборудования известными и доказывают возможность обработки на нём расчётных профилей. Все алгоритмы построены с заранее оговоренными допущениями, которые при необходимости могут быть сняты или заменены новыми. Некоторые алгоритмы, к примеру, фабрикации слябов для толстолистового стана или проектирования параметров черновой группы клетей широкополосного стана в значительной мере универсальны и потому достаточно сложны, но отбросив ненужные для решаемой задачи условия, пользователь всегда сможет их упростить. В большинстве алгоритмов для станов и агрегатов с рулонным способом производства в качестве исходных приняты слябы и рулоны относительной массой 20 т/м, но при необходимости не следует упускать из виду, что на самом деле относительная масса рулона убывает от передела к переделу. Все расчёты сделаны для прокатных клетей и другого оборудования с приводом от двигателей постоянного тока с двухзонным регулированием скорости и приемлемы для машин с регулируемыми двигателями переменного тока лишь в меру соответствия условий их службы. В Приложении А дан алгоритм элементарного проектного расчёта и конструирования механического оборудования главной линии листопрокатной клетки.

Режимы прокатки на спроектированных станах иногда заметно отличаются от закладываемых в проектные алгоритмы, а иногда после проведения проверочных расчётов нуждаются в корректировке и предсказанные параметры станов. Это значит, что предлагаемые здесь алгоритмы проектирования могут и должны быть улучшены, и пользователь всегда может либо согласиться с ними, либо заменить другими, хотя магистральным путём для профессионалов может быть только полное совмещение проектирования параметров оборудования и режимов обработки. Тем не менее, некоторые совмещённые алгоритмы, опубликованные нами ранее, оказались неоправданно громоздкими и потому здесь не приводятся и не комментируются.

Книга в большей мере претендует на демонстрацию подходов, методов расчёта, а не на их результаты. Точность получаемых результатов не обсуждается, по крайней мере, они достоверны лишь постольку, поскольку достоверны заложенные в расчёт модели. Они не могут быть также точнее использованных исходных данных, в частности, всегда надо считаться с тем, что сопротивление металла деформации или коэффициенты трения при горячей и холодной прокатке, как утверждают авторы [2, с. 159], не только установлены с некоторой погрешностью, но по своей природе являются неопределёнными. Никуда не уйти от тех реальностей, что сопротивление деформации $(1 \pm 0,1)\sigma_s$ может быть равновероятным [2, с. 153], а условный предел текучести наклёпанной изотропной электротехнической стали разных плавок даже в пределах одной группы легирования может изменяться более чем на 230 МПа [3, с. 62]. На эти обстоятельства перво-степенной важности для автоматизированного управления прокатными станами можно просто не обращать внимания при проектировании.

Для стимулирования разработки и отладки пользователями собственных машинных программ все вычисления иллюстрируются подстановкой данных в расчётные формулы, которые, как правило, дублируются вместе с номерами, под которыми они были введены ранее. Результаты расчётов даны по машинным распечаткам и при ручной проверке из-за промежуточных округлений могут не выдерживаться во всех значащих цифрах, большое число которых сохранено для удобства отладки. Представляя расчёты в проектах, следует сохранять лишь такое количество значащих цифр, которое оправдано точностью использованных математических моделей и измерительных приборов. Там, где решения достигаются последовательными приближениями, подстановкой в расчётные формулы иллюстрируется одно из них, первое для одного из профилей или проходов и последнее во внутренних циклах итераций по сплюсненной дуге контакта металла с вальками. Для всех профилей и проходов результаты как первого, так и последнего приближений приводятся в выводах. Нетрудно убедиться, что удовлетворительные решения можно получать уже в первых приближениях, если в качестве исходных брать данные, близкие к получаемым здесь в последних.

Все физические величины представлены в единицах системы СИ за исключением температуры, измеряемой в °С, и удельного расхода энергии, для которого принят кВт·ч/т. Коэффициент согласования единиц измерения физических величин c иногда включается в формулы явно, и это подчёркивает необходимость использования в расчётах по этим формулам только строго определённых единиц, но чаще его значения, особенно кратные 10, появляются только в подстановках. Целая часть аргумента x везде обозначена как $E(x)$, от фр. entier – целый.

Основная цель книги – показать взаимосвязанные замкнутые подходы к разработке параметров оборудования и режимов обработки металла в листопрокатных цехах. Демонстрируя вычислительные процедуры, книга предполагает вдумчивое отношение пользователя к её материалам. Все расчётные формулы должны быть подвергнуты тщательному анализу: какие физические величины в них входят? в каких единицах они измеряются? каковы коэффициенты согласования единиц измерения? почему использована именно эта расчётная формула и нет ли ей альтернативных, более адекватно учитывающих взаимосвязь существенных факторов? все ли существенные факторы учтены и нет ли возможности заменить формулу более полной?

В книге мало ссылок на публикации последних лет в общедоступных периодических изданиях. Список цитированных источников в основном состоит из книг, изданных 40 – 60 лет назад, многие из которых давно стали библиографической редкостью, и хотя бы часть этого наследия мы надеемся сохранить и передать новому поколению инженеров-прокатчиков.

1. ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. Общая характеристика прокатного производства

1.1.1. Технический уровень и качество продукции [4]

Многообразие продукции материального производства характеризует табл. 1, в отличие от первоисточника дополненная группой 6. Нетрудно видеть, что продукция каждой следующей группы создаётся на базе предыдущих.

Таблица 1. Классификация продукции материального производства

Класс 1. Продукция, расходуемая при потреблении			Класс 2. Продукция, расходуемая при эксплуатации свой ресурс		
Группа 1 Сырьё и природные топлива	Группа 2 Материалы, продукты, энергия	Группа 3 Расходные изделия	Группа 4 Неремонтируемые изделия	Группа 5 Ремонтируемые изделия	Группа 6 Объекты капитального строительства
Руды металлов, нерудные ископаемые, твёрдое, жидкое и газообразное топливо	Прокат чёрных и цветных металлов, химические продукты, искусственные строительные материалы, электроэнергия	Жидкое топливо в бочках, газы в баллонах, провода, кабели, канаты в катушках	Электровакуумные и полупроводниковые приборы, крепёжные изделия, подшипники качения	Промышленное оборудование, транспортные средства, средства автоматизации и систем управления	Гражданские и промышленные здания с технологическим оборудованием, сооружения, коммуникации

Продукция каждого вида характеризуется множеством *свойств*, то есть объективных особенностей, проявляющаяся при её создании, потреблении или эксплуатации. Свойства, характеризующие продукцию при изготовлении, называются *технологическими*, а при использовании продукции первого или второго класса соответственно *потребительскими* или *эксплуатационными*. Количественную или качественную характеристику свойств объекта называют *признаком*, при этом количественные признаки называют *параметрами*. Значения параметров, установленные нормативно-технической документацией, называют *номинальными*.

Совокупность свойств, обуславливающих пригодность продукции удовлетворять тем или иным потребностям в соответствии с её назначением, определяет *качество* продукции. Говорят, что качество продукции *закладывается* при проектировании, *воспроизводится* при изготовлении, *сохраняется* при транспортировке и хранении и *реализуется* при потреблении или эксплуатации. Потеря качества при эксплуатации объектов 5 и 6 групп компенсируется его *восстановлением* при ремонтах.

Уровень качества – это относительная характеристика объекта, основанная на сравнении показателей его качества с *базовым образцом*, представляющим собой некоторую специально подобранную совокупность показателей ка-

чества. На стадии проектирования за базовые принимают реально достижимые перспективные требования к соответствующей продукции, на стадии изготовления – требования, содержащиеся в национальных стандартах, или показатели продукции, наиболее эффективной в применении. Базовый образец устанавливают по показателям группы продукции аналогичной по назначению и условиям использования, характеризуемой одинаковой с оцениваемой продукцией номенклатурой показателей качества, методами определения их значений и единицами измерения. Параметры правильно выбранного базового образца не должны отличаться от оцениваемого более чем на 10–20 %.

Постановка продукции на производство всегда сопровождается технологической подготовкой, которая для продукции второго класса непременно предваряется проектно-конструкторской. Уровень качества, закладываемый при проектировании объекта, называют его *техническим уровнем*.

Показатели качества и технического уровня продукции

Признаки продукции, относящиеся к свойствам, определяющим её качество, называются *показателями качества*. Если они относятся к одному из свойств, их называют единичными, в противном случае – комплексными. Номенклатура показателей качества продукции чрезвычайно обширна и подразделяется на такие группы, как *показатели назначения, технического уровня и экономической эффективности*.

Показатели назначения характеризуют свойства, определяющие основные функции, для выполнения которых предназначена продукция и которые обуславливают область её применения. Для производственного оборудования это размеры инструмента, нагрузочная способность, мощность, скорость выполнения операций, для металлопроката – размеры, прочность, пластичность, свариваемость и др. Один-два количественных показателя этой группы, наиболее полно характеризующих служебное назначение объекта, определяют как *основные параметры*. Так, основными параметрами проката являются его номинальные размеры, листопрокатного стана – номинальная длина бочки валков, электродвигателя номинальные мощность и частота вращения.

Показатели технического уровня (уровня качества) характеризуют степень совершенства объекта на всех стадиях его жизненного цикла. В эту наиболее представительную группу входят достигнутые и перспективные уровни показателей назначения, показатели использования сырья и энергии, а также показатели надёжности, безопасности, технологичности, стабильности, транспортабельности, эргономические, экологические и др.

Среди показателей *экономической эффективности* назовём себестоимость и рентабельность продукции, а также её лимитную цену.

Оценка уровня качества и технического уровня продукции

Известны дифференциальный, комплексный и смешанный методы оценки уровня качества или технического уровня продукции.

При *дифференциальном* методе находят относительные показатели качества оцениваемой продукции по k -тому признаку s_k , $k = \overline{1, q}$, в сравнении с ба-

зовым образом. Поскольку с увеличением одних показателей (кпд) качество продукции растёт, а других (расход энергии) уменьшается, для установления относительных показателей используется та из двух формул, при расчёте по которой возросшему качеству отвечает их увеличение:

$$s_k = S_k / S_{\bar{0}k}, \quad s_k = S_{\bar{0}k} / S_k, \quad (1)$$

где S_k и $S_{\bar{0}k}$ – значения показателя качества оцениваемой продукции и базового образца. Если задан предел S_{nk} , верхний для показателей, которые стремятся минимизировать, а нижний – максимизировать, относительный показатель вычисляют по формуле

$$s_k = \frac{S_k - S_{nk}}{S_{\bar{0}k} - S_{nk}}. \quad (2)$$

Если все $s_k \geq 1$, уровень оцениваемой продукции не ниже базового, если все $s_k \leq 1$, – не выше. Если часть показателей превышает единицу, а другая не достигает её, то следует применить комплексный или смешанный метод.

Пример 1. Оценка уровня качества продукции

Пусть заданы два показателя качества оцениваемого и базового устройства. S и $S_{\bar{0}}$

k	S	$S_{\bar{0}}$	s	S_n	s
1. Удельная мощность	10	8	1,25	6	2,0
2. Материалоёмкость	15	18	1,20	20	2,5

Тогда относительные показатели качества оцениваемой продукции в сравнении с базовым образцом будут $s_1 = 10 / 8 = 1,25$, а $s_2 = 18 / 15 = 1,20$ (1).

Если кроме того заданы предельные значения удельной мощности и материалоёмкости S_n , то $s_1 = \frac{10-6}{8-6} = 2,0$ и $s_2 = \frac{15-20}{18-20} = 2,5$ (2).

Уровень качества оцениваемого образца по обоим показателям выше базового, поскольку все относительные показатели качества (выделены) превышают единицу.

Комплексный метод основан на применении обобщённых показателей качества, являющихся некоторой комбинацией единичных, таких, как главный, отражающий основное назначение продукции, интегральный или средний взвешенный. Для проката и прокатного оборудования такие показатели пока не определены. *Смешанный* метод используют при большом количестве единичных показателей, когда для оценки выбирают важнейшие из них в сочетании с одним из обобщённых.

1.1.2. Листовой прокат

Классификация и основные параметры

Прокат чёрных металлов производится из сталей различных групп: углеродистых обыкновенного качества, качественных конструкционных, низколегиро-

ванных, легированных. Он подразделяется на *виды*, отличающиеся технологическими и потребительскими свойствами, объёмом и содержанием обработки, состоянием поставки. Продукцией цехов с толстолистовыми станами 2800 – 5000 является *лист в пачках*. Цехи с широкополосными станами горячей и холодной прокатки 700 – 2500 кроме листа в пачках производят *широкие рулоны* с обрезанной или необрезанной кромкой и распущенные продольной резкой *узкие рулоны в связках*. На широкополосных станах горячей прокатки также получают *подкат* для холодной прокатки в рулонах с необрезанными кромками.

Лист – это прокат толщиной 0,18 – 50 мм и более при ширине в 20 – 2000 превосходящей толщину. Лист толщиной до 4 мм называют тонким, свыше 4 мм – толстым. Листы толщиной более 50 мм называют также *плитами*. Если длина листа в 10 – 20 раз превышает ширину, его называют *полосой*, а узкую тонкую, главным образом, резаную полосу – *лентой*. Заготовкой для плит обычно являются *слитки* штучной разливки, для листов и полос – непрерывнолитые или катаные *слябы*.

Часть готового горячекатаного проката поставляют в термически обработанном или травленном состоянии, а холоднокатаный – в отожжённом или нагартованном, с металлическими и (или) неметаллическими покрытиями. Из различных сталей и сплавов производят также многослойный лист.

Параметрами листов, полос и слябов являются их номинальные размеры – толщина h , ширина b и длина l , – а также масса

$$G = h b l \rho = F l \rho = g_b b, \quad (3)$$

где ρ и F – плотность и площадь сечения металла,

$g_b = G/b$ – относительная масса сляба или рулона, т/м, при этом длина сляба или полосы в рулоне

$$l = \frac{G}{\rho h b} = \frac{g_b}{\rho h}. \quad (4)$$

Плотность в холодном состоянии кипящей низкоуглеродистой стали в слитках штучной разливки 6,90, спокойной 7,30 [5, с. 49], в непрерывнолитых слябах 7,40 т/м³ [6, с. 260]. Плотность в холодном состоянии катаных слябов и готовой продукции из углеродистых и низколегированных сталей в расчётах будем считать равной 7,80 – 7,85 т/м³. Наибольшая плотность деформированного углеродистого металла непрерывной разливки достигается при 5 – 6-, а легированного при 8 – 10-кратной вытяжке [7].

Что же происходит с размерами и плотностью металла при горячей прокатке? Коэффициент линейного расширения железа при нагреве составляет $13 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, значит «горячие» размеры металла при температуре, положим, 1000°C в $(1 + 13 \cdot 10^{-6} \cdot 1000) = 1,013$ раза превышают «холодные». Объём металла при этом увеличивается в $1,013^3 = 1,0395$ раза, а плотность уменьшается в той же пропорции. Поставить размеры и плотность металла в зависимость от температуры в каждом проходе горячей прокатки не представляет труда, но от этого расчёты, не приобретая итоговой точности, станут лишь более громоздкими. Поэтому в книге все расчёты горячей прокатки ведутся в номинальных

«холодных» размерах при «горячей» плотности металла 7,575 т/м³. Это значит, что при остывании проката все полученные расчётом размеры уменьшатся примерно в 1,013 раза. При этом толщина продукта никогда не выйдет за пределы минусового допуска по ГОСТ 19903 – 74, а чтобы этого не произошло также и с его шириной и длиной, предусмотрены повышенные нормы боковой и концевой обрезки, оговоренные ниже в комментариях к формуле (27). Нетрудно показать, что при таком подходе действительные потери металла, характеризующиеся расходом коэффициентом за вычетом единицы, по сравнению с расчётными уменьшаются на треть или около того.

Многослойный прокат и прокат с постоянными покрытиями

В многослойном прокате толщины h_k и массы G_k слоёв соизмеримы, $k = \overline{1, q}$, и в сумме дают толщину h_0 и массу G_0^- продукта, так что

$$h_0 = \sum_{k=1}^q h_k, \quad G_0^- = h_0 b l \rho_0 = b l \sum_{k=1}^q \rho_k h_k = \sum_{k=1}^q G_k. \quad (5)$$

Тогда средняя плотность композита в объёме продукта будет

$$\rho_0 = \frac{1}{h_0 b l} \sum_{k=1}^q G_k = \frac{1}{h_0} \sum_{k=1}^q \rho_k h_k, \quad (6)$$

а массовая доля каждого компонента композита

$$e_k = \frac{G_k}{G_0^-} = \frac{\rho_k h_k}{\rho_0 h_0}, \quad \sum_{k=1}^q e_k = 1. \quad (7)$$

Продукцию с постоянными металлическими или неметаллическими покрытиями поставляют по номинальной толщине металла-основы \overline{h} , не принимая во внимание много меньшую толщину покрытий δ_k , $k = \overline{1, q}$, исчисляемую в мкм. В то же время массу продукта определяют взвешиванием, учитывая таким образом и массу покрытия. Считая плотность стальной основы равной 7,80 – 7,85 т/м³, для материалов наиболее распространённых покрытий будем принимать, т/м³:

Al –	2,7,	Pb –	11,3,
Zn –	7,1,	поливинилхлорид –	1,4,
Cr –	7,2,	полиэтилен –	1,0,
Sn –	7,3,	лаки, краски –	1,2–1,6.

Кроме толщины и объёмной плотности материала, покрытия характеризуют также поверхностной плотностью в г/м²,

$$m_k = \rho_k \delta_k, \quad (8)$$

при этом массовая доля покрытий может быть оценена по формулам

$$e_k = \frac{\rho_k \delta_k}{c \rho^o h + \sum_{k=1}^q \rho_k \delta_k}, \quad \sum_{k=1}^q e_k + e^o = 1, \quad (9)$$

где h – номинальная толщина металла-основы и продукта, мм;

$c = 10^3$ мкм/мм – коэффициент согласования единиц толщины;

ρ^o и ρ_k – плотность металла-основы и материала покрытия каждого вида. Если известна плотность материала покрытия и его доля в массе композита, толщина однослойного покрытия составит

$$\delta = \frac{c\rho^o h}{\rho y}, \quad y = \frac{1}{e} - 1, \quad (10)$$

а двухслойного

$$\delta_1 = \frac{c\rho^o h(y_2 + 1)}{\rho_1(y_1 y_2 - 1)}, \quad \delta_2 = \frac{c\rho^o h(y_1 + 1)}{\rho_2(y_1 y_2 - 1)}, \quad y_k = \frac{1}{e_k} - 1. \quad (11)$$

Производя расчёты, надо всегда следить, идёт ли речь об одностороннем или двустороннем покрытии, когда отдельно могут быть учтены как толщины покрытия с каждой стороны, так и суммарная.

Пример 2. Расход материалов и параметры продукции с покрытиями

Сколько цинка и полимеров плотностью 1,5 т/м³ содержит тонна металлопласта номинальной толщиной 0,5 мм, если плотность основы 7,8 т/м³, суммарная толщина двустороннего цинкового покрытия 30 мкм, а полимерного 100 мкм? Какова действительная толщина и объёмная плотность композита? Какова длина полосы шириной 1,25 м и массой в 1 т?

Доля покрытия каждого вида по формулам (9)

$$e^{Zn} = \frac{7,1 \cdot 30}{10^3 \cdot 7,8 \cdot 0,5 + 7,1 \cdot 30 + 1,5 \cdot 100} = 0,0500, \quad e^{pol} = \frac{1,5 \cdot 100}{10^3 \cdot 7,8 \cdot 0,5 + 7,1 \cdot 30 + 1,5 \cdot 100} = 0,0352,$$

$e^{осн} = 1 - 0,0500 - 0,0352 = 0,9148$, таким образом, в тонне продукта содержится 50 кг цинка, 35,2 кг полимера и 914,8 кг металла-основы.

Действительные толщина продукта и его средняя плотность

$$h_0 = 0,5 + 0,03 + 0,1 = 0,63 \text{ мм (5)}, \quad \rho_0 = \frac{10^3 \cdot 7,8 \cdot 0,5 + 7,1 \cdot 30 + 1,5 \cdot 100}{10^3 \cdot 0,63} = 6,7667 \text{ т/м}^3 \text{ (6)}.$$

При ширине 1,25 м полоса массой в 1 т, так же как и её основа, будут иметь длину

$$l = \frac{G}{\rho h b} = \frac{1}{6,7667 \cdot (0,63/1000) \cdot 1,25} = \frac{(1 - 0,0500 - 0,0352) \cdot 1}{7,8 \cdot (0,5/1000) \cdot 1,25} = 187,7 \text{ м (4)}.$$

По формулам (11) из долей каждого покрытия можно получить их исходные толщины.

Потребительские и технологические свойства проката

Потребительские свойства проката определяют, устанавливая в технических условиях поставки уровень показателей назначения. По мере сокращения допусков прокату присваивают нормальную, повышенную и высокую точность изготовления, а также нормальную, улучшенную, высокую и особо высокую плоскостность. Кромка полос может быть обрезной и необрезной, могут быть обусловлены те или иные требования к отделке поверхности. Для проката конструкционных сталей регламентируют механические свойства: временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, ударную вязкость, твёрдость. Некоторые виды проката подвергаются технологическим испытаниям на выдавливание или на изгиб в холодном состоянии, для других должна быть гарантирована свариваемость. Для проката с постоянными покрытиями

устанавливают их поверхностную плотность и толщину, для проката специальных сталей – специфические свойства, например удельные потери мощности при перемагничивании и магнитную индукцию для электротехнических.

В процессе обработки металла проявляются его технологические свойства, влияющие на режимы обработки. Например, при нагреве металла существенны такие свойства, как склонность к обезуглероживанию, перегреву, пережогу. Недостаточная теплопроводность металла в сочетании с пониженной пластичностью способствует образованию трещин, разрывов, поэтому стали, склонные к трещинообразованию, нагревают и охлаждают с пониженными скоростями, особенно в области температур структурных превращений. Затруднённая травимость окалина снижает скорость перемещения полосы через агрегаты травления, с пониженными скоростями и обжатами также прокатывают труднодеформируемые стали, часто обладающие не только низкой пластичностью при прокатке, но и высоким сопротивлением деформации. Низкоуглеродистые и низколегированные стали проблем с пластичностью обычно не создают.

В последние десятилетия наметилась тенденция к исключению из отечественных стандартов на условия поставки проката технологических свойств: исчезли ссылки на способы выплавки стали (мартеновская, бессемеровская, конвертерная), теряет значение указание на степень её раскисления (кипящая, полуспокойная, спокойная), лишь гарантируются стандартные или заданные заказчиком потребительские свойства.

1.1.3. Прокатный цех как производственная система

Производственная система – это организация людей и технических средств для удовлетворения общественных потребностей в продукции, соответствующей её профилю. *Профиль* производственной системы определяет *производственная программа* – задание по номенклатуре, количеству и качеству продукции, подлежащей выпуску в определённый календарный период. Наибольший годовой выпуск профильной продукции определяет *производственную мощность* производственной системы.

Совокупность всех видов продукции в прокатном производстве, как и вообще в металлургии, называют *ортаментом*. Прокатное производство бывает *массовым*, если производственная программа предусматривает выпуск в относительно больших количествах немногих видов продукции, либо производством *в широком ортаменте*, когда множество видов продукции поставляется потребителю малотоннажными партиями. *Качество* проката определяют технические условия поставки, сформулированные в национальных стандартах или в соглашениях производителя с заказчиком.

Производственный процесс

Следя ГОСТ 14.004–83, *производственным процессом* будем называть совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для выпуска и ремонта продукции. Эти действия состоят в её обработке, контроле, транспортировке и хранении, что в совокупности можно считать её *обслуживанием*.

Обработка в прокатном цехе – это целенаправленное изменение свойств металла (табл. 2) из начального состояния, характеризуемого вектором параметров X_0 , в конечное X_m через ряд промежуточных X_j , $j = \overline{1, m}$. Так, из заготовки толщиной h_0 продукция толщиной h_m обычно получается в несколько проходов с промежуточными толщинами h_j . Такую обработку будем называть *многофазовой*, под *фазой* обработки в разных контекстах подразумевая и действия над металлом, и технические средства или даже производственные структуры, где эти действия совершаются.

Таблица 2. Классификация процессов обработки металла в прокатных цехах

Процессы обработки металла			
деформационные (с сохранением массы)	массообменные		теплообменные
	с потерей массы	с приращением массы	
прокатка, правка, порезка, сматывание, дрессировка	обрезка, зачистка, травление	нанесение покрытий	нагрев, охлаждение, термическая обработка

Контроль – это проверка соответствия состояния металла некоторому эталонному, оговоренному в нормативно-технической документации. Различают входной контроль по X_0 , выходной по X_m , иногда промежуточный по X_j . Для проведения испытаний от прокатанного металла отбирают *пробы*, хотя предпочтительным всегда является его *неразрушающий* контроль в потоке.

Под *транспортировкой* будем понимать как перемещение металла в пространстве, так и его ориентацию (кантовку) при обработке и контроле, наконец, *хранение* – это выдержка металла на складах при сохранении его характеристик на оговоренном допустимом уровне.

Производственный процесс прокатного цеха имеет сложную структуру: кроме *основного* производства, отвечающего профилю цеха, в нём обычно бывают представлены многочисленные *вспомогательные* (подготовка валков, преобразование электроэнергии, изготовление тары и др.) и *побочные* (регенерация смазочно-охлаждающих жидкостей, травильных растворов и т.п.). Каждое из таких производств можно представить как некоторую совокупность технологических процессов.

Технологический процесс есть законченная часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и определению состояния предмета труда. Один из технологических процессов в каждом производственном является центральным, и все они состоят из технологических операций.

Технологической операцией называется законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. В прокатном производстве рабочее место – это часть производственной площади цеха, на которой один или несколько исполнителей с помощью технологического оборудования обслуживают поступающий на короткое время металл. Различают операции обработки, контроля, транспортировки и хранения металла, причём одна из операций в каждом технологическом процессе является центральной. Операции состоят из переходов.

Технологический переход (при прокатке проход, пропуск) – это законченная часть операции, выполняемая при неизменных режимах. Операции транспортировки состоят только из транспортных переходов перемещения и ориентации, все другие наряду с переходами собственно обработки, контроля или хранения содержат также и транспортные.

Основное прокатное производство в прокатном цехе включает следующие группы технологических процессов:

- приёмку заготовки, куда входят выгрузка из транспортных средств, входной контроль, складирование, хранение металла;
- подготовку металла к прокатке, если поступивший в цех металл не пригоден к непосредственной прокатке: зачистку поверхности и нагрев перед горячей, травление, а иногда и термическую обработку перед холодной прокаткой;
- собственно прокатку, центральный технологический процесс;
- отделку металла, если после прокатки он не удовлетворяет требованиям потребителей;
- сдачу готовой продукции: выходной контроль, сертификацию, упаковку, складирование, хранение, размещение в транспортных средствах, отгрузку.

Особенно многочисленны процессы отделки, которые заключаются в придании прокатанному металлу:

- компактного, транспортабельного вида (порезка, сматывание),
- заданной формы (правка, дрессировка),
- заданных объёмных и поверхностных свойств (термическая обработка, дрессировка, зачистка, травление, нанесение постоянных или временных покрытий).

Технологическое оборудование

Оборудование прокатных цехов классифицируют:

- по отношению к профилю цеха на оборудование основного, вспомогательных и побочных производств;
- по выполняемым функциям на оборудование для обработки, контроля и транспортировки металла или, в ином разрезе, на технологическое и подъёмно-транспортное;
- по физической природе процессов на механическое, тепло- и массообменное;
- по уровню сложности, диктуемому его местом в производственном процессе, на оборудование для выполнения технологических переходов, технологических операций и технологических процессов, условно на машины, установки и агрегаты.

Агрегат может быть построен так, что все операции над металлом, неподвижным или совершающим ограниченные возвратно-поступательные движения, ведутся последовательно во времени при соответствующем изменении параметров настройки агрегата. Тем самым достигается многофазовая обработка металла, при которой все его сечения приобретают с заданной точностью оди-

наковые свойства. Таковы нагревательные колодцы, камерные печи, мостовые краны, реверсивные прокатные клетки. Их называют агрегатами периодического действия (дискретными) или реакторами.

Агрегат может быть построен и так, что все операции над металлом ведутся в нём последовательно не только во времени, но и в пространстве. Перемещаясь относительно рассредоточенных обрабатывающих устройств (фаз) агрегата, сохраняющих во времени параметры начальной настройки или изменяющих их по заданному закону, различные сечения металла приобретают в них одинаковые свойства. Говорят, что обрабатывающие фазы (устройства) таких агрегатов расположены последовательным или непрерывным образом, если в каждый момент времени полоса находится в одной, либо сразу в нескольких или даже во всех фазах. Таковы методические нагревательные печи, последовательные или непрерывные прокатные станы и многочисленные агрегаты для подготовки и отделки металла при рулонном способе производства: для травления, отжига, нанесения покрытий, резки и т. п. Это агрегаты непрерывного действия или конвейеры.

Одни и те же процессы могут быть организованы как в непрерывных, так и в дискретных агрегатах, при этом каждому типу присущи свои достоинства и недостатки и все они постоянно улучшаются. Достигнув совершенства, агрегаты одного типа уступают место агрегатам другого, ещё более высокоорганизованным. Так, в своё время от одноклетевых реверсивных прокатных станов перешли к многоклетевым непрерывным, а теперь целые группы клеток заменяют одной, допускающей сверхобжатию. Во всяком случае, непрерывные и дискретные агрегаты и процессы сосуществуют в прокатном производстве, так что одни составляющие производственного процесса реализуются в непрерывных, а другие – в дискретных устройствах, почему прокатное производство, как и металлургическое в целом, рассматривая с этой точки зрения, называют *непрерывно-дискретным*.

Режимы обработки

Предписанные нормативно-технической документацией условия перевода металла из состояния в состояние называют *режимами обработки*. Всякий режим есть результат взаимодействия обрабатываемого металла и обрабатывающего технического устройства. Реализовать можно лишь те режимы, которые удовлетворяют *ограничениям*, накладываемым как свойствами металла, так и характеристиками обрабатывающего устройства, гарантируя при этом безопасность персонала и желаемое качество металла. Такие режимы называются *допускаемыми*. Поскольку обычно существует бесконечное множество допускаемых режимов, возникает проблема выбора: некоторые режимы оказываются лучше других по тому или иному критерию, *оптимальны* в смысле того или иного критерия. Режимы обработки, при которых достигается максимальная производительность оборудования, будем называть *предельными*. Они могут быть свободными, связанными или регламентированными.

Свободные режимы целиком определяются мощностью и скоростными возможностями оборудования. Именно такими в большинстве случаев быва-

ют режимы холодной прокатки полос на непрерывных и реверсивных станах, режимы роспуска рулонов на агрегатах продольной резки или правки на роллоправильных машинах. На *связанные* режимы оказывают влияние условия работы смежного оборудования: стан не может прокатать больше металла, чем нагреют печи, а скорость прокатки в непрерывной группе клетей при заданном режиме обжатий нельзя поднять сверх обусловленной возможностями двигателя одной из них. При *регламентированных* режимах ограничения накладывает обрабатываемый металл, а именно процессы, протекающие одновременно с основным и характеризующиеся большей инерционностью. Таковы режимы горячей прокатки. К примеру, скорость прокатки в чистовой группе клетей широкополосного стана ограничивается необходимостью получения таких температур конца прокатки металла, которые в сочетании с температурой сматывания в рулон приводят к заданным свойствам продукта, и тогда стан вынужденно используют как холодильник для металла.

Роль предельных режимов обработки в прокатном производстве весьма значительна, потому что даже при недостаточно напряжённой производственной программе цеха на пониженные режимы всё же не переходят, а используют предельные, создавая резерв рабочего времени. Нарушение этого принципа ведёт к деградации персонала.

1.1.4. Движение и потери металла в прокатном цехе

Производственный процесс прокатного цеха или технологический процесс агрегата можно представить как взаимодействие последовательности m обрабатывающих фаз с потоком продукции множества оговоренных в производственной программе видов. Для определённости параметры процесса будем помечать индексами, для применения которых установим следующие правила. Каждому виду продукции будем присваивать текущие номера $i = \overline{1, n}$ или $k = \overline{1, q}$, а каждой обрабатывающей фазе – $j = \overline{1, m}$. Индексом $j = 0$ обозначим фиктивную фазу «вход в систему» на входе в цех, при этом утрата параметром индекса j будет означать, что рассматривается только одна фаза, выход из цеха или цех в целом. В то же время замена нулём индексов i или k либо отсутствие обоих индексов будет означать, что параметр представляет собой сумму по этому индексу или средневзвешенное по сортаменту значение.

В неразрывном потоке металла выход каждой фазы всегда совпадает со входом в последующую, так что $A_{i,j} = A_{i,j+1}^{ex}$ и $A_{i,j}^{ex} = A_{i,j-1}$, но часто отличается от собственного входа из-за потерь металла, учитываемых *расходным коэффициентом*

$$v_{ij} = \frac{A_{i,j-1}}{A_{ij}} \geq 1 \quad (12)$$

или обратным расходному коэффициенту параметром, называемым *выходом годного*,

$$v_{ij} = 1/v_{ij} \leq 1. \quad (13)$$

Расходный коэффициент металла показывает количество заданного в передел металла для получения тонны годного, а выход годного – сколько продукта получается из тонны заданного. Если обработка ведётся без потерь металла либо он вовсе не поступает в рассматриваемую фазу, то $v_{ij} = v_{ij} = 1$.

Абсолютные потери металла в отдельных фазах при обработке продукции разных видов и суммарно по всему сортаменту найдутся по формулам

$$O_{ij} = A_{i,j-1} - A_{ij}, \quad O_{0j} = \sum_{i=1}^n O_{ij}. \quad (14)$$

В фиктивной фазе потерь нет, так что $O_{i0} = 0$, а сохраняющуюся от фазы к фазе на постоянном уровне сумму выхода и потерь до этой фазы включительно назовём *балансом металла*

$$B_{ij} = A_{ij} + \sum_{p=1}^j O_{ip} = A_{i0} = \text{const}, \quad i = \overline{0, n}. \quad (15)$$

Не все виды продукции обрабатываются во всех фазах цеха, и судить о том, какие именно фазы обработки проходит продукция каждого вида, позволяет *матрица назначений* (L_{ij}) [1, с. 44]. Матрица содержит n строк и $(m + 1)$ столбцов по числу видов продукции и фаз, включая вход в цех. Элементами матрицы являются единицы, если i -тый вид продукции обрабатывается в j -той фазе, и нули в противном случае, так что произведение

$$A_{ij} = A_{ij} L_{ij} - \quad (16)$$

это *выпуск* каждой фазой годной продукции i -того вида.

Если для последовательных фаз обработки записать уравнения связи между входами и выходами (12), перемножить их левые и правые части и приравнять эти произведения, после несложных преобразований можно получить *сквозной расходный коэффициент* \tilde{v}_i при движении через систему металла i -того вида

$$\left. \begin{array}{l} A_{i0} = A_{i1}v_{i1} \\ A_{i1} = A_{i2}v_{i2} \\ \dots\dots\dots \\ A_{i,m-1} = A_{im}v_{im} \end{array} \right\}, \quad \left. \begin{array}{l} A_{i0}A_{i1} \dots A_{i,m-1} = A_{i1}A_{i2} \dots A_{im}v_{i1}v_{i2} \dots v_{im}, \\ \tilde{v}_i = \frac{A_{\text{вх}}}{A_{\text{вых}}} = \frac{A_{i0}}{A_{im}} = \prod_{j=1}^m v_{ij}. \end{array} \right\} \quad (17)$$

Как видно, сквозной расходный коэффициент – это отношение количества металла, поступающего на глобальный вход системы, к полученному на глобальном выходе или произведение частных расходных коэффициентов.

Для выпуска продукции каждого i -того вида на выходе цеха и для суммарно выпуска каждой фазы и цеха в целом можно записать равенства

$$\tilde{A}_i = A_{im}, \quad A_{0j} = \sum_{i=1}^n A_{ij}, \quad A_{0m} = \tilde{A}_0 = \sum_{i=1}^n \tilde{A}_i \quad (18)$$

и определить доли продукции каждого вида в сортаменте каждой фазы и цеха

$$a_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{0j}}, \quad \sum_{i=1}^n a_{ij} = 1; \quad \tilde{a}_i = \frac{\tilde{A}_i}{\tilde{A}_0}, \quad \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i = 1. \quad (19)$$

Усреднение параметров

Частные расходные коэффициенты металла в каждой фазе и в цехе в целом можно усреднить по сортаменту, то есть по $i = \overline{1, n}$:

$$v_{0j} = \frac{A_{0,j-1}}{A_{0j}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ij} v_{ij}}{A_{0j}} = \sum_{i=1}^n a_{ij} v_{ij}, \quad \tilde{v}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n A_{i0}}{\tilde{A}_0} = \frac{A_{00}}{\tilde{A}_0} = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i \tilde{v}_i. \quad (20)$$

По формулам, подобным этим, можно также усреднять расходы электроэнергии, топлива, воды и других ресурсов, а вот формулы для усреднения по сортаменту массы, плотности материала и размеров листов и полос можно получить из условия аддитивности объёмов $V_0 = \sum V_i$, поверхностей $S_0 = \sum S_i$, длин $l_0 = \sum l_i$, а также числа единиц (заготовок, рулонов, листов) $Z_0 = \sum Z_i$ реальной и усреднённой продукции [8]. Такие усреднения незаменимы для сравнения относительной трудности портфелей заказов разных лет или разных цехов, а также при их проектировании.

Средняя масса заготовки G_0 и единицы годного G_0^- следует из аддитивности числа единиц продукции

$$\begin{aligned} v_i = \frac{G_i}{G_i^-}, \quad A_i = Z_i G_i^- = Z_i \frac{G_i}{v_i}, \quad A_0 = Z_0 G_0^- = G_0^- \sum_{i=1}^n Z_i = Z_0 \frac{G_0}{v_0} = \frac{G_0}{v_0} \sum_{i=1}^n Z_i \\ \Rightarrow G_0^- = \frac{A_0}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{G_i^-}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{G_i^-}}, \quad G_0 = \frac{A_0 v_0}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i v_i}{G_i}} = \frac{v_0}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i v_i}{G_i}}, \end{aligned} \quad (21)$$

средняя плотность материала ρ_0 из аддитивности объёмов

$$A_i = \rho_i V_i, \quad A_0 = \rho_0 V_0 = \rho_0 \sum_{i=1}^n V_i = \rho_0 \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\rho_i} \Rightarrow \rho_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i}}, \quad (22)$$

и тогда без труда находится средний объём единицы годного v_0^*)

$$G_i^- = \rho_i v_i, \quad G_0^- = \rho_0 v_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{G_i^-}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i v_i}} \Rightarrow v_0 = \frac{1}{\rho_0 \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i v_i}}. \quad (23)$$

Потребительскими характеристиками листового проката являются его толщина и поверхность, которую можно покрыть тем или иным его количеством, а средняя его толщина h_0 получается из условия аддитивности поверх-

^{*)} Курсивные строчные латинская v (вз) и греческая ν (ню) в гарнитуре Times New Roman малоразличимы.

ностей годной продукции:

$$A_0 = \rho_0 h_0 S_0 = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i S_i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_0 = \frac{A_0}{\rho_0 S_0} = \frac{A_0}{\rho_0 \sum_{i=1}^n S_i} = \frac{A_0}{\rho_0 \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\rho_i h_i}} = \frac{1}{\rho_0 \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i h_i}}. \quad (24)$$

Аналогично из условия аддитивности длин годной продукции получается средняя площадь сечения единицы продукции

$$f_0 = \frac{A_0}{\rho_0 l_0} = \frac{A_0}{\rho_0 \sum_{i=1}^n l_i} = \frac{A_0}{\rho_0 \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\rho_i f_i}} = \frac{1}{\rho_0 \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i f_i}}. \quad (25)$$

При одинаковом расходном коэффициенте и одинаковой плотности продукции всех видов, то есть при $v_0 = v_i$ и $\rho_0 = \rho_i$, все эти формулы упрощаются.

Теперь можно определить среднюю ширину, длину и поверхность единицы продукции:

$$b_0 = f_0 / h_0, \quad l_0 = v_0 / f_0, \quad s_0 = b_0 l_0 = v_0 / h_0. \quad (26)$$

Иногда, правда, ширину листовой продукции усредняют подобно толщине, но тогда при сохранении аддитивности поверхностей нарушается аддитивность сечений и длин. Пока нет стандарта на усреднение ширины полосы, выбор процедуры её усреднения остаётся за пользователем.

Пример 3. Усреднение размеров и массы проката

Пусть в сорimente рулонный прокат из низкоуглеродистых, сверхнизкоуглеродистых и высококремнистых электротехнических сталей с заметно различающимися плотностями и расходными коэффициентами металла при обработке. Ниже в таблице для продукции $i = \overline{1,3}$ заданы (выделено) доли в сорименте a , размеры проката h и b , м, расходный коэффициент v , масса исходного рулона G , т, и плотность металла ρ , т/м³:

i	a	h	b	G	ρ	v	G^-	v	f
1	0,44	0,008	1,85	37,00	7,82	1,02	36,2745	4,6387	0,014800
2	0,23	0,004	1,55	31,00	7,88	1,03	30,0971	3,8194	0,006200
3	0,33	0,002	1,25	25,00	7,55	1,05	23,8095	3,1536	0,002500
0	1,00	0,003570	1,3921	30,6913	7,7422	1,0322	29,7339	3,8405	0,004969

Остальные частные параметры (подсчёт для первой строки) и средние в строке $i = 0$ рассчитаны по только что полученным формулам. Так,

$$G_i^- = G_i / v_i = 37,0 / 1,02 = 36,2745 \text{ т} \quad (21),$$

$$v_i = G_i^- / \rho_i = 36,27 / 7,82 = 4,6387 \text{ м}^3 \quad (22),$$

$$f_i = h_i b_i = 0,008 \cdot 1,85 = 0,0148 \text{ м}^2,$$

$$l_i = v_i / f_i = 4,6381 / 0,0148 = 313,42 \text{ м},$$

$$v_0 = 0,44 \cdot 1,02 + 0,23 \cdot 1,03 + 0,33 \cdot 1,05 = 1,0322 \quad (20),$$

$$G_0 = \frac{1,0322}{\frac{1,02 \cdot 0,44}{37} + \frac{1,03 \cdot 0,24}{31} + \frac{1,05 \cdot 0,33}{25}} = 30,6913,$$

$$G_0^- = \frac{1}{\frac{0,44}{36,2745} + \frac{0,24}{30,0971} + \frac{0,33}{23,8095}} = \frac{30,6913}{1,0322} = 29,7339 \text{ т (21)},$$

$$\rho_0 = \frac{1}{\frac{0,44}{7,82} + \frac{0,24}{7,88} + \frac{0,33}{7,55}} = 7,7422 \text{ т/м}^3 \text{ (22)},$$

$$v_0 = \frac{1}{7,7422 \cdot \left(\frac{0,44}{7,82 \cdot 4,6387} + \frac{0,23}{7,88 \cdot 3,8194} + \frac{0,33}{7,55 \cdot 3,1536} \right)} = 3,8405 \text{ м}^3 \text{ (23)},$$

$$h_0 = \frac{1}{7,7422 \cdot \left(\frac{0,44}{7,82 \cdot 0,008} + \frac{0,23}{7,88 \cdot 0,004} + \frac{0,33}{7,55 \cdot 0,002} \right)} = 0,03570 \text{ м (24)},$$

$$f_0 = \frac{1}{7,7422 \cdot \left(\frac{0,44}{7,82 \cdot 0,0148} + \frac{0,23}{7,88 \cdot 0,0062} + \frac{0,33}{7,55 \cdot 0,0025} \right)} = 0,004969 \text{ м}^2 \text{ (25)},$$

$$b_0 = 0,004969 / 0,003570 = 1,3921 \text{ м}, \quad l_0 = 3,8405 / 0,004969 = 772,87 \text{ м},$$

$$s_0 = 1,3921 \cdot 772,87 = 3,8405 / 0,003570 = 1075,90 \text{ м}^2 \text{ (26)}.$$

Если в программе $A_0 = 250$ тыс. т проката трёх упомянутых видов в заданном соотношении a , её можно охарактеризовать такими интегральными параметрами:

$$A_i = a_i A_0 = 0,44 \cdot 250000 = 110000 \text{ т},$$

i	l	s	A	Z	L	S	V
1	313,42	579,84	110000	3032,4	950439	1758312	14066,5
2	616,04	954,86	57500	1910,5	1176928	1824239	7297,0
3	1261,43	1576,79	82500	3465,0	4370861	5463576	10927,1
0	772,87	1075,90	250000	8407,9	6498228	9046127	32290,6

$$Z_i = A_i / G_i^- = 110000 / 36,2745 = 3032,4, \quad L_i = Z_i l_i = 3032,4 \cdot 313,42 = 950439 \text{ м},$$

$$S_i = Z_i s_i = 3032,4 \cdot 579,84 = 1758312 \text{ м}^2, \quad V_i = Z_i v_i = 3032,4 \cdot 4,6387 = 14066,5 \text{ м}^3,$$

$$\text{кроме того } Z_0 = \sum_{i=1}^3 Z_i = 8407,9, \quad L_0 = \sum_{i=1}^3 L_i = Z_0 l_0 = 8407,9 \cdot 772,87 = 6498228 \text{ м},$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^3 S_i = Z_0 s_0 = 8407,9 \cdot 1075,90 = 9046127 \text{ м}^2,$$

$$V_0 = \sum_{i=1}^3 V_i = Z_0 v_0 = 8407,9 \cdot 3,8405 = 32290,6 \text{ м}^3.$$

Количества единиц продукции в таком расчёте получаются нецелыми, а если сделать их целыми, нецелыми станут количества произведённой продукции. С достаточной для практики точностью на это можно просто не обращать внимания.

Для сравнения: альтернативное усреднение ширины даёт

$$b_0 = \frac{1}{7,7422 \cdot \left(\frac{0,44}{7,82 \cdot 1,85} + \frac{0,23}{7,88 \cdot 1,55} + \frac{0,33}{7,55 \cdot 1,25} \right)} = 1,5338 \text{ м,}$$

при этом $f_0 = 0,003570 \cdot 1,5338 = 0,005475 \neq 0,04969 \text{ м}^2$,

$$l_0 = 3,8405 / 0,005475 = 701,47 \neq 772,87 \text{ м, но } s_0 = 1,5338 \cdot 701,47 = 1075,90 \text{ м}^2.$$

Частные формулы для расчёта расходных коэффициентов металла

Основные виды потерь металла в листопрокатных цехах – это боковая и концевая обрезь, потери при окислении (с окалиной) и травлении металла, а также угар. Обрезь, окалина и травильные шламы реализуются, а угаром называют безвозвратные потери металла.

Расходный коэффициент металла i -того вида в j -той фазе при обрезке кромок и концов

$$v_{ij}^b = \frac{b_{i,j-1}}{b_{ij}} = 1 + \frac{\Delta b_{ij}}{b_{ij}}, \quad v_{ij}^l = \frac{l_{i,j-1}}{l_{ij}} = 1 + \frac{\Delta l_{ij}}{l_{ij}} \quad (27)$$

где Δb и Δl – это нормы суммарной обрезки обеих кромок и обоих концов. При обрезке кромок подката толщиной менее 2 мм в непрерывном травильном агрегате рекомендуют принимать $\Delta b = 2 \times 15$, более толстого $\Delta b = 2 \times 10$ мм [9, с. 97], а при разделке рулонов на агрегатах продольной и поперечной резки $\Delta b = 2 \times 25$ мм. Концевая обрезь в непрерывных агрегатах достигает $\Delta l = 2 \times (0,5 - 1,5)$ м. В цехах с толстолистовыми станами при раскросе материнского раската на листы нормы обрезки кромок и концов с учётом отбора проб для испытаний металла составляют $\Delta b = 2 \times (50 - 80)$ мм и $\Delta l = 2 \times (0,75 - 1,00)$ м. Полный расходный коэффициент металла при обрезке

$$v_i = v_i^b v_i^l = \frac{(b_i + \Delta b_i)(l_i + \Delta l_i)}{b_i l_i} \approx v_i^b + v_i^l - 1. \quad (28)$$

Потери металла при нагреве в печах можно учесть через выход окалины или в виде отношения объёмов заданного и годного

$$v^{y2} = \frac{G^M}{G^M - \frac{S^M \delta^M}{c}} = \frac{G^M}{G^M - \frac{S^M m^{OK} d^{Fe}}{c}} = \frac{1}{1 - \frac{2m^{OK} d^{Fe}}{c\rho} \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{b} + \frac{1}{l} \right)} \approx \frac{h_0 b_0 l_0}{hbl} = \frac{(h + 2\delta^M / c)(b + 2\delta^M / c)(l + 2\delta^M / c)}{hbl}, \quad (29)$$

где G^M , S^M и ρ – масса сляба, т, его поверхность, м², и плотность металла, т/м³, h , b , l – размеры сляба (до нагрева с индексом 0), м,

$m^{ок}$ – количество окалины на поверхности сляба или её поверхностная плотность, кг/м²,

d^{Fe} – доля железа в окалине,

δ^M – толщина сгоревшего слоя металла, мм,

$c = 10^3$ – коэффициент согласования единиц массы, кг/т, или толщины, мм/м.

При температуре около 900°C окалина состоит из трёх слоёв: внутреннего FeO, толщина которого достигает 80 % всей толщины, промежуточного Fe₃O₄ (18 %) и наружного Fe₂O₃ (2 %) [10, с. 197]. Имея в виду, что атомная масса железа 56, а его окислов соответственно 72, 232 и 160, нетрудно рассчитать, что

$$d^{Fe} = 0,80 \cdot \frac{56}{72} + 0,18 \cdot \frac{168}{232} + 0,02 \cdot \frac{112}{160} = 0,77.$$

При плотности компонентов соответственно 6,25; 5,90 и 5,70 т/м³ [11 с. 161] плотность окалины составит

$$\rho^{ок} \approx 0,80 \cdot 6,25 + 0,18 \cdot 5,90 + 0,02 \cdot 5,70 = 6,18 \text{ т/м}^3.$$

Теперь из формулы (8), зная поверхностную плотность окалины, можно найти её толщину $\delta^{ок}$, а из расходного коэффициента (29) также толщину сгоревшего слоя металла

$$\delta^M = \frac{m^{ок} d^{Fe}}{\rho} \approx \frac{c(1 - 1/\nu^{j^2})}{2 \cdot \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{b} + \frac{1}{l} \right)}. \quad (30)$$

При обработке данных [12, с. 34–35] получена регрессионная формула, ставящая потери металла в угар при нагреве в печах широкополосного стана в зависимость от температур посада T_n , нагрева T_n , °C, и продолжительности нагрева t в часах:

$$\nu^{j^2} = 1 + \frac{\left(\frac{1}{h} + \frac{0,3}{b} + \frac{1}{l} \right) \cdot \left(1 + \frac{T_n}{6400} \right) \sqrt{\left(1 + \frac{1 - T_n/1600}{18 - T_n/77} \right)} \cdot t}{3125 - 1,83T_n}. \quad (31)$$

В ней заложено, что время томления составляет 20 % от общего времени нагрева, а поверхность слябов, на которой окалина разрушается и опадает, составляет половину от нижней и торцевой поверхностей слябов, которые, в свою очередь, составляют половину от общей.

Если пренебречь наличием окалины на боковой поверхности подката, расходный коэффициент, учитывающий потерю массы при травлении, можно рассчитать по формулам

$$v^{mp} = \frac{G^M + G^{OK}}{(1 - \Delta e / 100)G^M} = \frac{1}{1 - \Delta e / 100} \left(1 + \frac{m^{OK}}{c \rho h} \right) \approx 1 + \frac{m^{OK}}{c \rho h} + \frac{\Delta e}{100}. \quad (32)$$

Количество окалины на поверхности полосы перед травлением составляет $m^{OK} = 2 \times (40 \dots 50)$ г/м² [13, с. 15], а доля растворяющегося здорового металла при солянокислотном травлении $\Delta e = 0,2\%$ [13, с. 117].

При проектировании листопрокатных цехов можно также принимать следующие средние значения расходных коэффициентов металла, тем большие, чем тоньше полоса [1, с. 141]:

Нагрев в методических печах толкательных с шагающими балками	1,020 – 1,030
Технологические потери на ШСГП	1,015 – 1,020
Термическая обработка горячекатаного листа	1,003 – 1,007
Обработка в НТА подката конструкционной стали подката перед покрытиями	1,010
Технологические потери на стане холодной прокатки	1,015 – 1,020
Отжиг в колпаковых печах	1,035 – 1,055
Дрессировка	1,006 – 1,009
Отжиг в АНО	1,003 – 1,008
Обработка на агрегатах покрытий	1,005 – 1,009
Обработка на агрегатах подготовки в цехах жести	1,010
Разделка рулонов на агрегатах резки	1,020 – 1,025
	1,040 – 1,050
	1,035

Пример 4. Потери металла при нагреве и травлении

1. На поверхности непрерывнолитого сляба размерами 0,25×1,5×10,5 м в процессе нагрева образовался слой окалины в количестве 10 кг/м². Плотность металла и окалины 7,4 и 6,2 т/м³. Расходный коэффициент металла при этом, подсчитанный по формулам (29), будет

$$v^{yz} = \frac{1}{1 - \frac{2 \cdot 10 \cdot 0,77}{10^3 \cdot 7,4} \left(\frac{1}{0,25} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{10,5} \right)} \approx \frac{\left(0,25 + \frac{2 \cdot 1,04}{10^3} \right) \left(1,5 + \frac{2 \cdot 1,04}{10^3} \right) \left(10,5 + \frac{2 \cdot 1,04}{10^3} \right)}{0,25 \cdot 1,5 \cdot 10,5} \equiv 1,0100,$$

где толщина сгоревшего слоя металла и соответственно толщина слоя окалины

$$\delta^M = \frac{10^3 \cdot (1 - 1/1,0100)}{2 \cdot \left(\frac{1}{0,25} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{10,5} \right)} \approx \frac{10 \cdot 0,77}{7,4} = 1,0405 \text{ (30) и } \delta^{OK} = 10 / 6,2 = 1,6129 \text{ мм (8).}$$

2. При нагреве сляба от температуры посада $T_n = 20^\circ\text{C}$ до температуры нагрева $T_H = 1250^\circ\text{C}$ за время $t = 2,5$ ч получим расходный коэффициент металла

$$v^{yz} = 1 + \frac{\left(\frac{1}{0,25} + \frac{0,3}{1,5} + \frac{1}{10,5} \right) \cdot \left(1 + \frac{20}{6400} \right) \sqrt{\left(1 + \frac{1 - 20/1600}{18 - 1250/77} \right)} \cdot 2,5}{3125 - 1,83 \cdot 1250} = 1,0102 \text{ (31).}$$

3. При солянокислотном травлении подката толщиной 2 мм с содержанием окалина 50 г/м² с каждой стороны и растворении 0,2% здорового металла расходный коэффициент, учитывающий потерю массы металла, составит

$$v^{mp} = \frac{1}{(1-0,2/100)} \left(1 + \frac{2 \cdot 50}{10^3 \cdot 7,85 \cdot 2} \right) \approx 1 + \frac{2 \cdot 50}{10^3 \cdot 7,85 \cdot 2} + \frac{0,2}{100} = 1,0084 \quad (32).$$

1.1.5. Время работы, производительность и пропускная способность оборудования

Фонды времени и их использование

Для выполнения производственной программы оборудование каждой обрабатывающей фазы располагает фондами времени. Различают следующие фонды времени:

- *календарный* 8760 часов в год,
- *номинальный*, получающийся, если из календарного вычесть время капитальных и планово-предупредительных ремонтов,
- *рабочий* T_p , равный номинальному за вычетом времени текущих простоев.

Нормативные фонды времени проектируемых станов и агрегатов представлены в табл. 3 [1, с. 154]. На эти же нормы следует ориентироваться при назначении времени работы не указанного в таблице оборудования и при расширении и реконструкции действующего, внося в них коррективы, учитывающие его конструкцию и состояние.

Фактическое время оборудования T расходуется на выполнение работы и паузы. Паузы обычно учитывают внутри цикла обработки каждой единицы продукции (см. п. 1.2.3), и тогда фактическое время складывается как сумма циклов. Однако с необходимостью обработки длинномерных полос в продолжительных режимах (см. п. 1.2.4) и распространением «бесконечных» процессов возникла также необходимость и в их внецикловом учёте, когда паузы в цикл обработки не включают, а фактическое время получается как сумма циклов и пауз. В любом случае фактическое время ни в одной фазе не может выходить за пределы рабочего фонда, то есть

$$T_{0j} = \sum_{i=1}^n T_{ij} \leq T_{pj}, \quad (33)$$

при этом доли времени на обработку продукции каждого вида в фактическом определяются формулами

$$b_{ij} = \frac{T_{ij}}{T_{0j}}, \quad \sum_{i=1}^n b_{ij} = 1. \quad (34)$$

Разность между рабочим и фактическим временем представляет собой резерв, источником которого является недостаточное наполнение портфеля заказов.

Таблица 3. Годовое время работы станов и агрегатов

Станы и агрегаты	Капитальные и планово- предупредительные ремонт, сут/год	Номинальное время работы		Простои		Годовое число рабочих часов
		сут/год	ч/год	%	ч/год	
Толстолистовые	16	349	8376	14	1176	7200
Непрерывные и полунепрерывные горячей прокатки	14	351	8424	17/19	1424/1624	7000/6800
Непрерывные холодной прокатки при графике непрерывном прерывном	11	354	8496	17,5/20	1496/1696	7000/6800
	–	305	7320	15/18	1120/1320	6200/6000
Реверсивные холодной прокатки при графике непрерывном прерывном	11	354	8496	15	1296	7200
	–	305	7320	15	1120	6200
Дрессировочные при графике непрерывном прерывном	11	354	8496	17,5	1496	7000
	–	305	7320	15	1120	6200
Непрерывные травильные агрегаты и агрегаты отжига	11	354	8496	15	1296	7200
Агрегаты поперечной резки при графике непрерывном прерывном	13	352	8448	17	1448	7000
	–	305	7320	15	1120	6200
Агрегаты продольной резки при графике непрерывном прерывном	13	352	8448	19,5	1648	6800
	–	305	7320	18	1320	6000
Непрерывные агрегаты нанесения покрытий горячим способом	13	352	8448	11	948	7500
Непрерывные агрегаты нанесения покрытий электролитическим способом, а также агрегаты электролитической очистки	13	35	8448	17	1148	7000
Непрерывные агрегаты нанесения полимерных покрытий	–	305	7320	11	820	6500
Числитель относится к станам с механизированной перевалкой валков, знаменатель – без механизированной перевалки						

Чистое время работы оборудования T' получают расчётом по теоретическим формулам. Оно всегда меньше фактического на величину так называемых скрытых простоев, связанных, например, с колебаниями массы заготовок, скорости обработки и других параметров процесса, несогласованием в работе смежных фаз или просто с недостаточно квалифицированными действиями персонала. Их учитывают через коэффициент использования оборудования $\mu < 1$, который по сути является поправкой на случайный характер производственного процесса в детерминированные модели расчёта времени и переводит расчётное время работы оборудования в практически достижимое. Для расчёта частных и средних значений коэффициента использования оборудования при внутри- и внецикловом учёте пауз существуют формулы

$$\mu_{ij} = \frac{T'_{ij}}{T_{ij}}, \quad \mu_{ij} = \frac{T'_{ij} + T_{nij}}{T_{ij}}, \quad i = \overline{0, n}, \quad \mu_{0j} = \frac{T'_{0j}}{T_{0j}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ij} \mu_{ij}}{T_{0j}} = \sum_{i=1}^n b_{ij} \mu_{ij}, \quad (35)$$

при этом суммарная длительность внецикловых пауз

$$T_{nij} = \frac{A_{ij} v_{ij}}{G_{ij}} t_{nij}, \quad T_{n0j} = \sum_{i=1}^n T_{nij} = Z_0 t_{n0j} = \frac{A_{0j} v_{0j}}{G_{0j}} t_{n0j}, \quad (36)$$

где t_n и Z_0 – пауза, приходящаяся на одну единицу продукции и их число (21), производимое за время T_{0j} .

При проектировании прокатных цехов Гипромез рекомендовал принимать следующие средние значения коэффициента использования оборудования [14, с. 326]:

для дрессировочных станов и агрегатов продольной резки холоднокатаного металла при роспуске на узкие полосы	0,75
для реверсивных и непрерывных станов холодной прокатки, выпускающих продукцию смешанного сортамента, для агрегатов поперечной резки холоднокатаных полос и отделочных агрегатов с широким сортаментом продукции	0,80
для толстолистовых станов и агрегатов отделки горячекатаных полос.....	0,85
для непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки, для непрерывных станов бесконечной холодной прокатки и отделочных агрегатов специализированного узкого сортамента	0,90

Производительность и пропускная способность)*

Количество годного металла, обрабатываемое в единицу времени, характеризует *производительность* цеха, участка, агрегата, машины. Частная производительность оборудования каждой фазы и средняя по сортаменту определяются формулами

*) В практике Гипромеза этим терминам отвечают соответственно средняя по годному и максимальная по заданному производительность.

$$Q_{ij} = \frac{A_{ij}}{T_{ij}}, \quad Q_{0j} = \frac{A_{0j}}{T_{0j}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ij} Q_{ij}}{T_{0j}} = \sum_{i=1}^n b_{ij} Q_{ij} = \frac{A_{0j}}{\sum_{i=1}^n \frac{A_{ij}}{Q_{ij}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_{ij}}{Q_{ij}}}. \quad (37)$$

Деля первое из этих выражений на второе с учётом (19) и (34), получим

$$\frac{Q_{ij}}{Q_{0j}} = \frac{a_{ij}}{b_{ij}}, \quad (38)$$

а это значит, что доля продукта в сортаменте равна доле времени на его обработку тогда и только тогда, когда производительность при его обработке равна средней по сортаменту.

Интенсивность работы оборудования должна быть такой, чтобы не только обеспечивать его заданную производительность, но и компенсировать возможные потери металла при обработке и неизбежные потери времени, названные выше скрытыми простоями. Такую достаточную интенсивность работы оборудования определяют отношением заданного в передел к чистому времени процесса и называют *пропускной способностью* или технически возможной производительностью.

При учёте пауз внутри цикла пропускная способность и производительность оборудования при обслуживании продукции каждого вида и в среднем определяются формулами

$$P_{ij} = \frac{G_{ij}}{T'_{ij}} = \frac{A_{ij} v_{ij}}{T_{ij} \mu_{ij}} = \frac{Q_{ij} v_{ij}}{\mu_{ij}}, \quad i = \overline{0, n}, \quad Q_{ij} = \frac{P_{ij} \mu_{ij}}{v_{ij}}, \quad i = \overline{0, n}, \quad (39)$$

а при внецикловом

$$P_{ij} = \frac{G_{ij}}{T'_{ij}} = \frac{A_{ij} v_{ij}}{T_{ij} \mu_{ij} - T_{nij}} = \frac{v_{ij}}{\frac{\mu_{ij}}{Q_{ij}} - \frac{T_{nij}}{A_{ij}}} = \frac{Q_{ij} v_{ij}}{\mu_{ij} - \frac{T_{nij}}{T_{ij}}}, \quad i = \overline{0, n}, \quad (40)$$

$$Q_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\frac{v_{ij}}{P_{ij}} + \frac{T_{nij}}{A_{ij}}} = \frac{P_{ij}}{v_{ij}} \left(\mu_{ij} - \frac{T_{nij}}{T_{ij}} \right) = \frac{P'_{ij} \mu_{ij}}{v_{ij}}, \quad i = \overline{0, n},$$

где P' – условная пропускная способность агрегата (67) и согласно (36) $T_n / A = t_n v / G$. При $T_{nij} = 0$ формулы (40) редуцируются в (39). Для средней по сортаменту пропускной способности при внутрицикловом учёте пауз кроме того существуют соотношения

$$P_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ij} \mu_{ij} P_{ij}}{\mu_{0j}} \quad \text{и} \quad P_{0j} = \frac{v_{0j}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_{ij} v_{ij}}{P_{ij}}}, \quad (41)$$

последнее из которых действительно также и при внецикловом учёте пауз.

Пример 5. Параметры загрузки листопрокатного цеха продукцией двух видов

Ниже представлен результат использования некоторых из предложенных выше формул при внутрицикловом учёте пауз. В таблице: объём производства \tilde{A} , масса единицы заготовки (исходного рулона) G , пропускная способность P , расходный коэффициент металла ν , коэффициент использования оборудования μ . Исходные данные выделены.

i	\tilde{A}	G	P	ν	μ	a	Q	T	b	T'	Z	A^*
1	1200000	18,0	320,0	1,025	0,9	0,545	280,98	4271	0,601	3844	68333	1230000
2	1000000	24,0	450,0	1,020	0,8	0,455	352,94	2833	0,399	2266	42500	1020000
0	2200000	20,3	368,2	1,0227	0,8601	1,000	309,68	7104	1,000	6110	110833	2250000

Суммарный объём производства $\tilde{A}_0 = 1200000 + 1000000 = 2200000$ т (18),

доли профилей в сортаменте $a_i = 1200000 / 2200000 = 0,545$ (19),

производительность $Q_i = 320 \cdot 0,90 / 1,025 = 280,98$ (39),

время работы $T_i = 1200000 / 280,98 = 4271$ (37), $T_0 = 4271 + 2833 = 7104$ ч (33),

доля времени на обработку профиля $b_i = 4271 / 7104 = 0,601$ (34),

чистое время работы $T'_i = 4271 \cdot 0,9 = 3844$, $T'_0 = 7104 \cdot 0,8601 = 3844 + 2266 = 6110$ (35) и (33),

число рулонов $Z_i = 1200000 \cdot 1,025 / 18,0 = 68333$ и $Z_0 = 68333 + 42500 = 110833$ (21),

расход заготовки $A_i^* = 1,025 \cdot 1200000 = 1230000$ (12) и $A_0^* = 1230000 + 1020000 = 2250000$ т (18).

Средние: масса рулона $G_0 = \frac{1}{0,545/18 + 0,455/4} = \frac{2200000}{108333} = 20,3077$ т (21),

расходный коэффициент металла $\nu_0 = 0,545 \cdot 1,025 + 0,455 \cdot 1,020 = 1,0227$ (20),

коэффициент использования оборудования

$$\mu_0 = 6110 / 7104 = 0,601 \cdot 0,90 + 0,399 \cdot 0,80 = 0,8601 \text{ (35),}$$

производительность

$$Q_0 = \frac{1}{0,545/280,96 + 0,455/352,98} = 0,601 \cdot 280,98 + 0,399 \cdot 352,94 = 309,68 \text{ т/ч (37),}$$

пропускная способность $P_0 = \frac{309,68 \cdot 1,0227}{0,8601} =$

$$= \frac{0,601 \cdot 0,90 \cdot 320 + 0,399 \cdot 0,8 \cdot 450}{0,8601} = \frac{1,0227}{0,545 \cdot 1,025/320 + 0,455 \cdot 1,020/450} = 368,2 \text{ ч (39) и (41).}$$

При внецикловом учёте пауз, составляющих в том же рабочем времени, положим, 700 и 300 часов для продукции каждого вида, а суммарно 1000 часов в год, все параметры предыдущего расчёта сохраняются, кроме пропускных способностей, которые численно значительно возрастают:

i	\tilde{A}_i	G	P	ν	μ	a	Q	T	b	T_n	T'	Z	A^*
1	1200000	18,0	391,23	1,0250	0,9	0,545	280,96	4271	0,601	700	3144	68333	1230000
2	1000000	24,0	518,71	1,0200	0,8	0,455	352,98	2833	0,399	300	1966	42500	1020000
0	2200000	20,3	440,29	1,0227	0,8601	1,000	309,68	7104	1,000	1000	5110	110833	2250000

Так, $\mu_0 = (5110+1000) / 7104 = 0,8601$ (35)

$$P_1 = \frac{1,025}{0,90/280,96 - 700/1200000} = \frac{280,96 \cdot 1,025}{0,90 - 700/4271} = 391,23 \text{ (40),}$$

$$\begin{aligned} \text{а в среднем } P_0 &= \frac{1,0227}{0,8601/309,68 - 1000/2200000} = \\ &= \frac{1,0227}{0,545 \cdot 1,025/391,23 + 0,455 \cdot 1,020/518,71} = 440,29 \text{ (40) и (41).} \end{aligned}$$

1.2. Некоторые вопросы теории прокатки и теории машин

1.2.1. Температура металла при горячей прокатке

Излучение

Излучение является основным фактором, определяющим падение температуры металла на станах горячей прокатки при транспортировке и в паузах между проходами. Согласно дифференциальному уравнению лучистого теплообмена Стефана–Больцмана баланс тепла при охлаждении излучением записывают в виде

$$dQ = -Gc_{\bullet} \cdot dT = F\varepsilon_{\bullet}CT^4 \cdot dt_o \quad \text{или} \quad -\frac{dT}{T^4} = \frac{S\varepsilon_{\bullet}C}{Gc_{\bullet}} dt_o = \frac{2\varepsilon_{\bullet}C}{h\rho c_{\bullet}} dt_o, \quad (42)$$

где dQ – потери тепла, Дж,

S – полная теплоотдающая поверхность металла, м²;

$G = (S/2)h\rho$ – масса металла, кг, при толщине в мм и плотности в т/м³;

ε_{\bullet} и c_{\bullet} – степень черноты металла и истинная теплоёмкость, Дж / (кг·К),

при температурах горячей обработки;

$-dT$ – падение температуры (о чём говорит минус), К;

C – постоянная лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴);

dt_o – приращение времени охлаждения, с. Интегрируя уравнение (42) в пределах от начальной температуры T_{j-1} до конечной $T_j < T_{j-1}$, будем иметь

$$-\frac{T^{-3}}{-3} \Big|_{T_{j-1}}^{T_j} = \frac{2\varepsilon_{\bullet}C}{\rho c_{\bullet}} \cdot \frac{t_o}{h}, \quad \frac{1}{T_j^3} - \frac{1}{T_{j-1}^3} = C_0 \frac{t_o}{h},$$

где $C_0 = \frac{6\varepsilon_{\bullet}C}{\rho c_{\bullet}}$ – теплофизический коэффициент. При $C = 5,9 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м²·К⁴),

$\varepsilon_{\bullet} = 0,8$ [15, с. 151], $\rho = 7,575$ т/м³ и $c_{\bullet} = 680$ Дж / (кг·К) прямая подстановка (обратите внимание на единицы измерения!) даёт $C_0 = 0,055 \cdot 10^{-9}$ мм / (К³·с). Переходя к температурной шкале Цельсия и вводя соответствующий масштабный коэффициент, получим выражение для температуры металла после охлаждения

$$T_j = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{1000}{T_{j-1} + 273}\right)^3 + C_0 \frac{t_o}{h}}} - 273, \quad (43)$$

в котором теперь $C_0 = 0,055 \text{ мм} / ((\text{К}/1000)^3 \cdot \text{с})$. Тогда падение температуры полосы вследствие теплопотерь излучением найдётся по формуле

$$\Delta T_j^u = T_{j-1} - T_j = T_{j-1} - \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{1000}{T_{j-1} + 273}\right)^3 + C_0 \frac{t_{oj}}{h_{j-1}}}} + 273. \quad (44)$$

В последнем из выражений (42) приращения иногда заменяют разностями и получают ещё одну формулу, приемлемую для отыскания падения температуры в небольшие промежутки времени, например, при прокатке в чистовых клетях широкополосных станов. Для черновых клетей этих станов и контролируемой прокатки на толстолистовых разностная формула завышает результаты тем больше, чем больше время охлаждения, поэтому для общности везде будем использовать только формулу (44).

Условия излучения верхней и нижней поверхностями полосы в линии прокатных станов существенно различны, но на это обычно не обращают внимания, подразумевая, видимо, что ухудшение излучения со стороны нижней поверхности компенсируется теплоотдачей оборудованию и охлаждающей воде.

Время охлаждения

Теплопотери излучением зависят от времени охлаждения металла в ожидании прокатки. Формулы для его определения на переднем и заднем концах полосы (индексы «голова» g и «хвост» x) приведены в табл. 4.

Таблица 4. Формулы для расчёта времени охлаждения в ожидании прокатки

Условия прокатки	Передний конец	Задний конец
Первый проход	$t_{o1}^g = \frac{L_p}{v_p} + t_{п1}$	$t_{o1}^x = t_{o1}^g + t_1$
В последовательно расположенных клетях или в непрерывной группе клетей	$t_{oj}^g = \frac{L_p - l_{j-1}}{v_p} + t_{j-1}$	$t_{oj}^x = \frac{L_p - l_{j-1}}{v_p} + t_j$
В реверсивной клетке	$t_{oj}^g = t_{пj}$	$t_{oj}^x = t_{oj}^g + t_{j-1} + t_j$

Здесь L_p и v_p – длина и скорость роллганга перед клетью, в которой ведётся прокатка, м и м/с;

t_j и $t_{пj}$ – длительность прокатки в j -том проходе и время ожидания прокатки в первом проходе или паузы между проходами, с. При реверсивной про-

катке результаты, полученные по формулам табл. 4 для проходов, совершаемых в направлении «назад», следует исправить, используя алгоритм переприсваивания

$$x = t_{oj}^c, t_{oj}^c = t_{oj}^x, t_{oj}^x = x. \quad (45)$$

За минимальное время пауз между проходами принимают время реверса клетки

$$\min t_{\Pi} = t_{рев} = \frac{n_{j-1}^6}{b_{j-1}} + \frac{n_j^3}{a_j} \quad \text{либо} \quad \min t_{\Pi} = t_{рев} = \frac{v_{j-1}^6}{\beta_{j-1}} + \frac{v_j^3}{\alpha_j} \quad (46)$$

где a и b либо α и β – угловые либо линейные ускорение и замедление двигателя и полосы, об/с (мин·с) либо м/с², а верхние индексы z и v относят их к захвату и выбросу металла. При соблюдении так называемого тройного условия В.А.Тягунова $t_{рев} = t_{xp} = t_{ny}$ [16, с.233] время реверса равно времени хода рольганга, то есть возвращения рольгангом выброшенного в предыдущем проходе раската к клетке, и времени переустановки зазора между валками нажимным устройством.

При правильном ведении расчётов суммарное время движения переднего и заднего концов полосы за m проходов одинаково:

$$t_{\Sigma}^c = t_{\Sigma}^x, t_m + \sum_{j=1}^m t_{oj}^c = \sum_{j=1}^m t_{oj}^x. \quad (47)$$

Другие факторы теплопотерь металла

Теплоотдача металла окружающему воздуху *конвекцией* в начале прокатки при высокой температуре и малых скоростях очень мала и возрастает к окончанию прокатки. Считают, что она составляет 5 – 7 % от потерь тепла излучением [11, с. 130; 17, с. 276 и др.], и учитывают введением поправки в падение температуры при лучистом теплообмене, используя для оценки совместно влияния излучения и конвекции формулу

$$\Delta T_j^{ук} = (1,05 \dots 1,07) \Delta T_j^y. \quad (48)$$

Для учёта влияния на температуру металла *гидросбива* окалины используют формулу И. Шварцера [11, с. 165]

$$\Delta T^{sc} = \frac{0,73T}{h(1+v)}, \quad (49)$$

где T , h и v – температура, толщина и скорость полосы в зоне гидросбива, °С, мм и м/с. Она получена в условиях широкополосных станов, но за отсутствием аналога для толстолистовых будем применять её также и для них.

Теплоотдачу валкам $\Delta T^{6л}$ будем рассчитывать по формуле

$$\Delta T_j^{6л} = 0,218 \frac{T_{j-1} - \Delta T_j^{ук} - T_j^{6л}}{h_{j-1} + h_j} \sqrt{\frac{l_{cj}}{v_j(1 + h_j/h_{j-1})}}, \quad (50)$$

где $T_{j-1} - \Delta T_j^{ук}$ и $T_j^{6л}$ – температура металла в начале охлаждения и валка, °С,
 l_c , h и v – сплюснутая дуга контакта, толщина полосы (до и после прохода) и скорость полосы, мм и м/с. В отличие от формулы Х.Венцеля [11, с. 141; 18, с. 311] в ней конкретизировано значение температуры на входе в клеть, явно введена сплюснутая дуга контакта полосы с валком, а числовые коэффициенты вынесены из-под радикала.

Для расчёта приращения температуры полосы вследствие поглощения энергии деформации ΔT^δ , следуя рекомендациям [15, с. 153], используем его прямую связь с расходом энергии на собственно прокатку

$$\Delta T_j^\delta = 3600 \eta_{np} w_{npj} / c_\bullet = 4,76 w_{npj} = 4,76 w_{kj} \eta_{kj}, \quad (51)$$

где w_{np} и w_k – удельный расход энергии на прокатку, а также на прокатку и преодоление трения в клетке, кВт·ч/т;

$c_\bullet = 680$ Дж / (кг·К) – истинная теплоёмкость стали, принятая на том же уровне, что и в формуле (43);

η_k и $\eta_{np} \approx 0,9$ – КПД клетки и доля теплоты деформации, идущая на повышение температуры полосы.

Окончательно температура металла после прохода, разная для переднего и заднего концов полосы из-за разницы в теплопотерях излучением, найдётся по формуле

$$T_j = T_{j-1} - \Delta T_j^{ук} - \Delta T_j^{6л} + \Delta T_j^\delta - \Delta T_j^{эс}. \quad (52)$$

Сравнительный анализ результатов, получаемых по многочисленным формулам разных авторов для учёта различных факторов, определяющих температуру металла при горячей прокатке, дан в справочнике [11, с. 114–166].

1.2.2. Сопротивление металла деформации

В представлении В.И.Зюзина с соавторами [18, 19] сопротивление горячей деформации, МПа, определяется формулой

$$\sigma_s = A \varepsilon^B u^C e^{-DT}, \quad (53)$$

где ε – степень деформации в проходе, измеряемая в долях единицы;
 u – скорость деформации, с⁻¹;

T – температура металла, °С. Коэффициенты к формуле для сталей сортамента листопрокатных станов, пересчитанные нами для подстановки переменных в объявленных единицах измерения, представлены в табл. 5.

Таблица 5. Коэффициенты к формуле (53)

Марка стали	A	B	C	D	Диапазон			h, мм	Источ-ник
					T, °C	ε , доли	u , с ⁻¹		
45	1300	0,252	0,143	0,0025	800–1200	0,05–0,40	0,1–100		[20]
40Х13	4220	0,280	0,087	0,0033	900–1200	0,05–0,40	0,1–100		[20]
X18H9T	3180	0,280	0,087	0,0028	600–1200	0,05–0,40	0,1–100		[20]
08кп	970	0,229	0,177	0,0024	700–1200	0,05–0,50	1–300		[21]
08Ю	1195	0,215	0,139	0,0025	700–1250	0,10–0,70	1–300	2–6	Данные ВНИИ метмаш
Ст3сп	1325	0,252	0,143	0,0025	900–1250	0,10–0,50	1–300	2–4	
					700–1250	0,07–0,50	1–60	6–25	
13Г1С,17Г1С,22ГЮ	1455	0,252	0,143	0,0025	750–1250	0,07–0,50	1–120	6–15	
09Г2С	3520	0,204	0,125	0,0032	830–1250	0,10–0,50	1–300	2–4	
					700–1250	0,07–0,50	1–60	св.5	
09Г2СФ	2020	0,163	0,145	0,0027	800–1250	0,10–0,50	1–120	4–8	
08Г2СФБ	2890	0,203	0,135	0,0029	700–1250	0,10–0,50	1–120		
	2350	0,120	0,110	0,0030	700–1200	0,10–0,45	0,3–200		
09Г2ФБ ^{*)}	288	1,450	0,1070	0,00235	700–1150	0,05–0,40	2–65		
13ГС	1665	0,389	0,0570	0,00167	700–1150	0,05–0,40	2–65		[22]
12ХМ	2920	0,410	0,0640	0,00235	700–1150	0,05–0,40	2–65		[22]
10ХСНД	2550	0,459	0,0586	0,00220	700–1150	0,05–0,40	2–65		[22]
15ГБ	2290	0,352	0,0389	0,00233	700–1150	0,05–0,40	2–65		[22]
15Г2АФ	660	0,347	0,0840	0,00090	700–1150	0,05–0,40	2–65		[22]
15Г2ФБ	815	0,395	0,1380	0,00104	700–1150	0,05–0,40	2–65		[22]
20Х13	3535	0,604	0,0214	0,00217	800–1100	0,05–0,40	2–25		[23]
60	3275	0,495	0,0201	0,00230	800–1100	0,05–0,40	2–25		[23]
10ХНДП	805	0,400	0,1120	0,00130	св. 800	до 0,35	до 30		[24]
05Г1Б	2312	0,167	0,1000	0,00296	700–1150	0,05–1,00	1–55		[25]
10Г2ФБ	2373	0,117	0,1267	0,00311	700–1150	0,05–1,00	1–55		[25]
X65	3008	0,194	0,0972	0,00320	700–1150	0,05–1,00	1–55		[25]
X70	1530	0,134	0,1019	0,00253	700–1200	0,05–1,00	1–55		[25]

^{*)} Для этой стали в формуле (53) вместо ε аргументом является $\ln(100\varepsilon)$.

Коэффициенты, рекомендованные для стали 08кп, можно применять для других низкоуглеродистых сталей, если считать, что $A = k_M A$, где поправка k_M принимает значения 1,03 (Ст2кп), 1,07 (Ст3кп), 1,15 (Ст3сп), 1,17 (10сп) [21, с. 188]. Можно также использовать поправку $k_M = 0,83 + 0,3(C + Mn + Si)$, учитывающую процентное содержание в сталях химических элементов [11, с. 281] или поправку $k_M = 0,89 + 0,22C$ к коэффициенту A для стали Ст3сп [26].

Сопrotивление *холодной* деформации от скорости деформации и температуры зависит значительно меньше, чем от степени. Обычно считают, что случайные колебания прочности исходной полосы перекрывают влияние скорости и температуры и определяют принимаемый за сопротивление деформации условный предел текучести по формуле

$$\sigma_s = A + B\varepsilon_\Sigma^C, \quad (54)$$

куда в отличие от формулы (53) следует подставлять не степень деформации в проходе, а суммарную от начала прокатки из недеформированного состояния и только в процентах. График этой функции называют *кривой наклёпа*. Если в это уравнение подставлять параметры из табл. 6, сопротивление деформации получится в МПа.

Таблица 6. Коэффициенты к формуле (54)
и поправка к удельному расходу энергии k_w в формуле (364)

Марка стали	A	B	C	k_w	Марка стали	A	B	C	k_w
Ст0	245	55	0,46	1,035	17X18H9	588	37	0,70	2,050
Ст1	255	13	0,73	0,852	2111, 2112	294	33	0,60	1,127
Ст2	294	30	0,62	1,114	2211, 2212	368	33	0,63	1,338
08	294	75	0,48	1,381	2311, 2312	392	54	0,52	1,450
08Ю, 08кп	225	34	0,60	1,000	2411, 2412, 3411–3416	480	110	0,38	1,792
10	294	29	0,64	1,133	Анизотропная NiB-сталь ^{*)}	550	21	0,81	1,837
20	368	31	0,64	1,322	IF-сталь 01ЮТ ^{**)}	230	10	0,86	0,876
09Г2	314	58	0,46	1,206	HC260LA	312	32	0,61	1,167
10Г2	343	43	0,59	1,362	HC380LA	483	19	0,75	1,508
12ГС	490	98	0,34	1,633	HC420LA	612	23	0,69	1,717
12X18H9Т	402	24	0,91	1,985	H400LA	670	15	0,86	1,984
^{*)} Сталь с высокой магнитной индукцией ^{**)} Interstitial free steel – сталь без свободных атомов внедрения.									

Для конструкционных сталей таблица воспроизводит рекомендации, приведённые в справочниках [18, с. 132; 20, с. 114–136], с пересчётом в систему СИ, для электротехнических – данные проектных материалов одного из цехов холодной прокатки электротехнических сталей, для сталей по данным [119], для сверхнизкоуглеродистой 01ЮТ – аппроксимацию выражения $\sigma_s = 230 + 7,24\varepsilon_s - 0,025\varepsilon_s^2$ [27].

При необходимости учесть влияние на сопротивление холодной деформации температуры и скорости деформации можно обратиться к справочнику [11 с. 299]. При прокатке подогретых рулонов, практикуемой для труднодеформируемых сталей, или если при расчёте режима прокатки рассчитывается температура полосы T , °С, её влияние на сопротивление деформации металла можно приближённо учитывать по формуле

$$\sigma_s = \sigma_s \left(1 - 0,01\sqrt{T - 20} \right). \quad (55)$$

Формулы (53) и (54) с коэффициентами из табл. 5 и 6 безоговорочно пригодны для проектных расчётов, но для целей управления технологическими процессами прокатки их следует адаптировать к конкретным условиям либо заменить специальными. Большое количество таких формул, учитывающих не только химический состав, но и условия предшествующей обработки изотропной электротехнической стали, содержит монография [3, с. 61 и далее].

1.2.3. Цикл работы и пропускная способность оборудования

Режимы обработки металла одной плавки, как правило, неизменны, и чтобы минимизировать управляющие вмешательства в процесс, обработку заготовок в цехе ведут *от плавки к плавке*, не допуская их разрыва и смешивания. Несколько плавков, обрабатывающихся на стане между перевалками, образуют *монтажную партию*.

Заготовки исходной массой G в листопрокатных цехах поступают в обработку *поштучно* либо *пакетами* по r штук в каждом и массой rG , при этом состоянии технического устройства проторяется от заготовки к заготовке или от пакета к пакету. Для большинства станов и агрегатов листопрокатных цехов $r = 1$, но для нагревательной методической печи r – это число рядов слябов, для колпаковой печи – число рулонов в садке, а для дисковых ножниц – число узких полос, на которое распускается широкая. Множество укрупнённых сваркой или сшивкой встык рулонов для бесконечной обработки на непрерывных агрегатах в отличие от пакета назовём *сборкой*.

Следуя ГОСТ 3.1109–82, интервал времени, через который периодически производится выпуск заготовок, пакетов и сборок, будем называть *временем цикла* или просто *циклом* $t_{\text{ц}}^*$, а время от начала до конца их обработки – *временем (длительностью) обработки* $t_{\text{об}}$. Обработка заготовок, пакетов и сборок перемежается *паузами*, в течение которых выполняются вспомогательные транспортные и контрольные переходы либо протекают сопутствующие процессы. Паузы, как упоминалось, обычно учитывают в цикле обработки, но если цикл превышает 10 минут, то вне его. Время обработки, цикла и пауз на действующем оборудовании определяют хронометражом, что неприемлемо для проектирования не существующего нового, когда естественным становится расчёт.

В простейших технических устройствах, способных выполнять только отдельные переходы (правильная машина), времена цикла и обработки совпадают:

$$t_{\text{об}} = t_{\text{ц}} = t + t_{\text{п}}, \quad (56)$$

где t – время собственно обработки,

$t_{\text{п}}$ – время паузы. Доля времени обработки во времени цикла (или относительная продолжительность собственно обработки в цикле или безразмерное время обработки) при этом составляет

$$z = t / t_{\text{ц}} \leq 1, \quad (57)$$

причём равенство здесь достигается только при внецикловом учёте пауз или при бесконечной обработке. Безразмерное время переводит составные части цикла из слагаемых в сомножители, так что

$$t_{\text{ц}} = t / z, \quad t = z t_{\text{ц}}, \quad t_{\text{п}} = (1 - z) t_{\text{ц}}, \quad (58)$$

и это сильно упрощает решение многих практических задач.

Для многофазовой обработки в технических устройствах реакторного типа (см. классификацию технологического оборудования в разделе 1.1.3) условие (56) обобщается выражениями

*) В научной и, к сожалению, учебной литературе существует разноречие: вместо термина «цикл» в том смысле, в каком он введён здесь, используют термины «такт», «темп», «ритм», «период». До разработки стандарта в этой терминологии каждый пользователь должен разобраться для себя раз и навсегда.