ISSN 0132–0890
www.rudmet.ru

# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1107)

03.2024

*Тема номера:*

***90 лет Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г. И. Носова (стр. 15-62)***

# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом «Руда и Металлы»

**№ 3 (1107), март 2024 г.**

Издается с 1961 г.

**Ежемесячный научно-технический и производственный журнал по актуальным проблемам металлургии и машиностроения**

**Учредители:**

Акционерное общество «Издательский дом «Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Федеральное бюджетное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

**При участии:**

ПАО «ММК»
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королева»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов»



**Редакционный совет:**

Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников, А. Г. Воробьев

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина, Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада), Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов, С. В. Коновалов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. В. Мунтин, А. Е. Пелевин, Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, Е. Ю. Сидорова, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, И. В. Чуманов, А. Н. Шаповалов, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

**Редакция:**

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова


*Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства науки и высшего образования РФ включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям: 2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением; 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов; 2.6.3. Литейное производство; 2.6.4. Обработка металлов давлением; 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы; 2.6.17. Материаловедение; 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.*


Издатель – АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6, стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:
- фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6, стр. 2, МИСИС, оф. 617
- почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75
Эл. почта: chermet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал по актуальным проблемам металлургии и машиностроения «Черные металлы» № 3 (1107), март 2024 г.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)



Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»



Отпечатано с предоставленных готовых файлов в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33
Дата выхода в свет: 04.04.2024. Формат 60x90/8.
Печ. л. 11. Офсетная печать. Бумага офсетная.
Тираж 800 экз. Цена свободная



За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» – материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции и редсовета журнала



Подписной индекс: 12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



© Оформление. АО «Издательский дом «Руда и Металлы», «Черные металлы», 2024
© Фото на обложке: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ


**Обогащение руд**

*А. Е. Пелевин.* Производство концентрата для внедоменного получения железа из титаномагнетитовой руды . . . 4

**Производство стали**

*М. А. Матвеева, И. В. Чуманов, А. В. Ерпалов, К. А. Хорошевский.* Исследование усталостных характеристик многослойного металлического материала, полученного методом электрошлакового переплава . . . 10

**90 лет Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г. И. Носова**

Приветствие главного редактора В. М. Колокольцева . . . 15

*В. А. Бигеев, А. С. Харченко, С. К. Сибагатуллин, М. В. Потапова, И. А. Гришин.* Разработка схемы производства ферроникеля и чугуна из руды Сахаринского месторождения по водородной технологии . . . 16

*А. С. Харченко, С. К. Сибагатуллин, Е. О. Харченко, В. А. Бегинюк.* Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности . . . 22

*В. М. Колокольцев, Н. А. Феоктистов, А. С. Савинов, Е. В. Скрипкин.* Исследование процессов формирования структуры и свойств валковых сталей с целью создания их новых составов . . . 28

*Д. Н. Чикишев, Э. М. Голубчик.* Развитие системных подходов в проектировании технологий производства проката из трубных сталей в условиях толстолистовых станов . . . 33

*А. В. Колдин, Д. В. Терентьев, Р. Р. Дёма, О. Р. Латыпов.* Моделирование тепловых процессов при широкополосной горячей прокатке . . . 40

*А. Б. Сычков, О. Н. Тулупов, А. Н. Завалищин, Н. А. Баранов.* Структурообразование и формирование механических и технологических свойств арматурного проката при поточной термической обработке . . . 47

*Д. В. Константинов, А. Г. Корчунов, А. Ю. Столяров, Ю. Ю. Ефимова.* Исследование структуры и свойств стальной арматуры периодического профиля после знакопеременного изгиба с растяжением . . . 56

**Прокатка и другие процессы ОМД**

*А. Р. Фастыковский, А. И. Мусатова, Н. В. Мартюшев, А. И. Карлина.* Обоснование нормативных моделей производительности листопрокатного цеха. Сообщение 2 . . . 63

**Нанесение покрытий и защита от коррозии**

*Е. И. Пряхин, В. А. Азаров.* Повышение адгезии фторопластовых покрытий к стальным поверхностям труб с перспективой их использования в газотранспортных системах . . . 69

**Металлургическое оборудование**

*С. С. Чибухчян.* Влияние условий эксплуатации на механические свойства деталей двигателя карьерных машин и машин металлургического производства . . . 77

**Экономика и финансы**

*В. Г. Когденко, Н. А. Казакова.* Анализ рискоустойчивости различных типов компаний черной металлургии в условиях санкций . . . 83

**Хроника**

Сергею Михайловичу Горбатюку — 70 лет . . . 76

Коллеги о плодотворном сотрудничестве с журналом «Черные металлы» . . . 88

К 100-летию Вули Аршаковича Григоряна . . . III стр. обл.

УДК 658.511:621.771

# Обоснование нормативных моделей производительности листопрокатного цеха. Сообщение 2

***А. Р. Фастыковский***, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и металловедения ЕВРАЗ ЗСМК [1], докт. техн. наук, доцент, эл. почта: fastikovsky@mail.ru
***Н. В. Мартюшев***, доцент отделения материаловедения [2], канд. техн. наук, эл. почта: martjushev@tpu.ru
***А. И. Мусатова***, преподаватель Института дополнительного образования [1], эл. почта: musatova-ai@yandex.ru
***А. И. Карлина***, научный сотрудник [3], канд. техн. наук, эл. почта: karlinat@mail.ru
[1] Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
[2] Томский политехнический университет, Томск, Россия.
[3] Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

Проблемы рационального функционирования прокатных комплексов связаны с формированием нормативов производительности с применением предложенных тактовых моделей работы основного и вспомогательного оборудования с учетом сортамента продукции. Рассмотрена процедура построения технически возможных тактов работы вспомогательного оборудования для конкретного листопрокатного цеха (методических нагревательных печей, правильной машины, дисковых и гильотинных ножниц). Кроме того, обоснована длительность подготовки заданных партий слябов к нагреву, определены такты подачи с транспортной пачки от участка зачистки до участка нагрева к методическим печам. Представлена общая схема формирования производительности листопрокатного цеха. Приведены фрагменты полученных результатов технически возможных и нормативных тактов работы основного и вспомогательного оборудования, а также производительности цеха. При этом показаны примеры выявленных «узких мест» в производственных процессах. Определены нормативные коэффициенты трудности (сложности) по сортаменту выпускаемой продукции на основе нормативов производительности листопрокатного цеха. Предложены организационно-технические мероприятия, направленные на повышение эффективности работы исследуемого листопрокатного цеха. Реализованы разработанные оптимальные режимы обжатий в черновой и чистовой клетях по сортаменту продукции. На основании проведенных модельных расчетов выявлено, что «узким местом» в цехе является чистовая клеть, имеющая многие технические недостатки. В связи с этим предложены два варианта замены чистовой трехвалковой группы клетей, которые требуют капитальных вложений. Сравнительная оценка нормативных значений технико-экономических показателей по двум вариантам реконструкции представлена в табличной форме, на основе которой решение о выборе варианта принимает руководство предприятия.
***Ключевые слова***: тактовые модели, вспомогательное оборудование, листопрокатный цех, технически возможные такты, нормативы зачистки слябов, оценивание, производительность, реконструкция, эффективность работы цеха.
***DOI***: 10.17580/chm.2024.03.10

## Введение

Для обоснования пропускной способности (производительности) листопрокатного цеха в работе [1] определены тактовые модели процесса прокатки в клетях (черновой двухвалковой и чистовой трехвалковой) на основании разработанной процедуры рациональных обжатий для всего сортамента с учетом заданных параметров готовых листов (по толщине, длине и группам марок стали). Основным показателем интенсивного использования прокатных цехов является производительность в единицу времени его работы [1–3].

Исследуемый листопрокатный цех представляет комплекс основного и вспомогательного оборудования, где в процессе производства металл проходит последовательно следующие стадии обработки: нагрев, прокатку, правку, порезку и пакетировку (**рис. 1**) [1, 4]. Бесперебойное выполнение всех операций на каждой стадии предопределяет уровень непрерывности всего процесса, что должно обеспечить высокую производительность цеха [5–8]. Для обоснования регламентированного режима работы всего комплекса предложен тактовый подход функционирования листопрокатного цеха [9–11].

Целью работы является определение нормативной производительности листопрокатного цеха, на основе которой предложено совершенствование действующих технологических процессов путем модернизации основного оборудования (прокатных клетей). При выборе мероприятий учитывали физическое и моральное состояние действующего оборудования, «узкие места» в производственном процессе, рентабельность и платежеспособность предприятия [12–14].

## Тактовые модели работы вспомогательного оборудования

Вспомогательное оборудование листопрокатного цеха включает методические печи, правильную машину, дисковые и гильотинные ножницы, а также участок подготовки слябов к нагреву на складе (см. рис. 1) [1].

Такт работы каждого вида оборудования включает машинное время обработки металла и длительность пауз между его обработкой.

Такт работы нагревательной печи можно определить по формулам

© Фастыковский А. Р., Мартюшев Н. В., Мусатова А. И., Карлина А. И., 2024

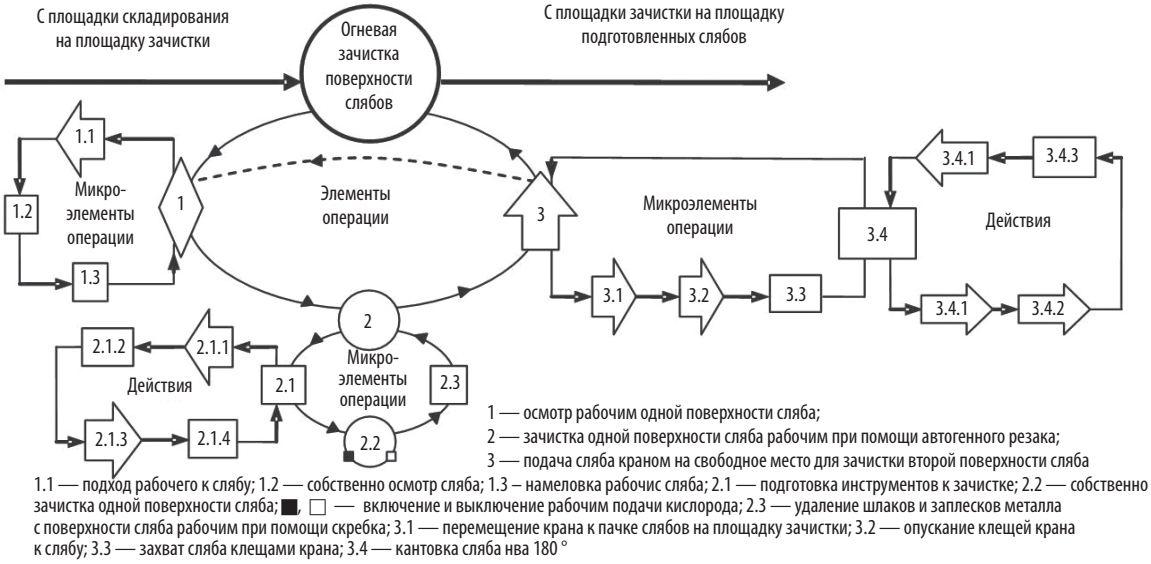


**Рис. 1.** Схема декомпозиции процесса огневой зачистки поверхности сляба

$$T_{нп} = \left(\frac{t_н}{E_н} + t_з\right) / n_р + \tau_{по};\ t_з = \frac{b_с + S_m}{V_m};\ E_н = \frac{L_{пп}}{b_с}, \quad (1)$$

где $t_н$ — время нагрева одного сляба в печи (по технологическим режимам); $t_з$ — длительность загрузки сляба в печь; $n_р$ — число продольных рядов слябов, нагреваемых в печи, шт; $\tau_{по}$ — продолжительность поднятия и опускания заслонки печи (на основе хронометражных наблюдений); $L_{пп}$ — полезная длина пода печи, мм; $E_н$ — емкость печи, шт.; $b_с$ — ширина сляба, мм; $S_m$ — зазор между слябами, мм; $V_m$ — скорость толкателя, м/с.

Расчеты тактов работы печи проводили с учетом толщины слябов $h_с$ и регламентированной длительности их нагрева по пяти группам марок стали. Так, продолжительность нагрева слябов первой группы из спокойных марок стали составляет: $t_н$ = 1,33 ч (при $h_с$ = 120 мм); $t_н$ = 1,58 ч (при $h_с$ = 140 мм); $t_н$ = 3,0 ч (при $h_с$ = 190 мм). В четвертой группе из коррозионностойких сталей: $t_н$ = 2,33 ч (при $h_с$ = 130 мм) и $t_н$ = 3,3 ч (при $h_с$ = 165 мм). Расчеты проводили также в зависимости от емкости печи, т. е. числа одновременно нагреваемых слябов, которая зависит от ширины слябов $b_с$ при прочих равных условиях. Так, при $b_с$ = 650 мм емкость печи составляет $E_н$ = 60 шт.; при $b_с$ = 700 мм $E_н$ = 55 шт.; при $b_с$ = 850 мм $E_н$ = 46 шт.

Технически возможный такт работы методической печи для рассматриваемого примера составил $T^{тв}_{нп}$ = 98,5 с; такт работы участка нагрева, включающий одновременное функционирование трех печей $T^{тв}_{ун}$ = 32,83 с.

Такт работы листоправильной машины определяют соотношениями

$$T_{лп} = t^{лп}_м + \tau_0;\ t^{лп}_м = \frac{L_р}{V_{лп}}, \quad (2)$$

где $t^{лп}_м$ — машинная длительность правки, с; $\tau_0$ — время начальной паузы, $L_р$ — длина раската в последнем пропуске чистовой клети, м; $V_{лп}$ — скорость правки, м/с.

Такт работы дисковых ножниц определяют по формулам

$$T_д = t^d_м + \tau_d;\ t^d_м = \frac{L_р}{V_d}, \quad (3)$$

где $t^d_м$ — машинное время резки продольных кромок листа, с; $\tau_d$ — время установки раската перед ножницами, с (по хронометражным наблюдениям); $V_d$ — скорость резания, м/с.

Такт работы гильотинных ножниц состоит из следующих элементов:

$$T_г = \tau_у + t^г_{мр} + t_{тр}, \quad (4)$$

где $\tau_у$ — время установки листа перед обрезкой переднего конца раската, с; $t^г_{мр}$ — машинное время порезки раската, с; $t_{тр}$ — длительность транспортировки раската через ножницы, с.

Второй и третий элементы такта определяют соотношениями

$$t^г_{мр} = t^г_м \cdot \left(\frac{L^г_р}{l_л} + 1\right);\ t_{тр} = \frac{l_л}{V_{рг}} \cdot n_к, \quad (5)$$

где $t^г_{мр}$ — машинная длительность собственно реза, с; $L^г_р$ — длина готового раската, м; $l_л$ — длина готового листа, м; $V_{рг}$ — скорость рольганга, м/с; $n_к$ — число мерных листов в раскате, шт.

Расчеты тактов работы листоправильной машины, дисковых и гильотинных ножниц проводили по заданным размерам листов с учетом длины каждого соответствующего раската после прокатки в чистовой группе клетей, а также схемы раскроя готового раската на определенное число листов.

Технически возможные значения тактов работы вспомогательного оборудования для рассматриваемого примера составили $T^{тв}_{лп}$ = 50,77 с, $T^{тв}_d$ = 53,45 с, $T^{тв}_г$ = 44,51 с; $T^{тв}_{ун}$ = 32,83 с.

## Методика нормирования длительности операций на участке подготовки партии слябов к нагреву

Одним из факторов, влияющих на стабильную работу системы (листопрокатного цеха), является своевременная подготовка партии слябов для подачи их на участок нагрева к методическим печам. На участке подготовки слябы проходят контроль качества поверхности. С этой целью партия

слябов поплавочно подается электромостовым краном со склада на площадку зачистки, где сначала рабочий осматривает, а затем зачищает поверхность каждого сляба с использованием специального инструмента.

Для обоснования продолжительности подготовки заданной партии слябов к нагреву определили соответствующие нормативы. Разработке нормативов предшествовали проведение фотохронометражных наблюдений, обработка и анализ полученных данных. Процесс зачистки (см. рис. 1) декомпозировали на следующие операции: машинные (крановые), машинно-ручные (зачистка поверхности сляба рабочим при помощи автогенных резаков) и ручные (обозначение контролером дефектов на поверхности сляба мелом — намеловка). Расчеты выполняли для партии слябов с учетом числа рабочих-огнерезчиков.

Длительность огневой зачистки одного сляба состоит из следующих элементов:

$$T_{\text{с}} = 2\tau_{\text{о}} + t_{\text{кр}} + 2\tau_{\text{з}}, \text{ с}, \quad (6)$$

где $\tau_{\text{о}}$ — продолжительность визуального осмотра одной поверхности сляба первым рабочим, с; $t_{\text{кр}}$ — продолжительность транспортировки сляба электромостовым краном на свободное место, с; $\tau_{\text{з}}$ — длительность зачистки одной поверхности сляба вторым рабочим, с.

Нормативную длительность огневой зачистки поверхности сляба рассчитывали в следующей последовательности:

– расчет нормативной продолжительности зачистки 1 м поверхности сляба для широкой и узкой граней соответственно:

$$\tau^{\text{н}}_{\text{зч1}} = \tau_{\text{з}} \cdot n_{\text{дф1}};\ \tau^{\text{н}}_{\text{зч2}} = \tau_{\text{з}} \cdot n_{\text{дф2}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{з}}$ — длительность зачистки одного дефекта, с; $n_{\text{дф1}}$ — число дефектов на широкой грани сляба площадью $S = b_{\text{сл}}\cdot 1$ м, шт.; $n_{\text{дф2}}$ — число дефектов на узкой грани сляба площадью $S = h_{\text{сл}}\cdot 1$ м, шт.

– нормативная продолжительность собственно зачистки поверхности сляба:

$$\tau_{\text{зч}} = 2(\tau_{\text{зч1}} + \tau_{\text{зч2}});\quad \tau_{\text{зч1}} = \tau^{\text{н}}_{\text{зч1}} \cdot l_{\text{сл}};\quad \tau_{\text{зч2}} = \tau^{\text{н}}_{\text{зч2}} \cdot l_{\text{сл}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{зч1}}$, $\tau_{\text{зч2}}$ — длительность зачистки широкой и узкой граней сляба соответственно, с; $l_{\text{сл}}$ — длина сляба, м.

– общая нормативная длительность зачистки поверхности одного сляба:

$$\tau_{\text{з}} = \tau_{\text{зч}} + \tau_{\text{к}} + \tau_{\text{нм}}, \text{ с}, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{нм}}$ — продолжительность кантовки и осмотра дефектов соответственно.

Далее определяли нормативную длительность зачистки слябов партии (состоящей из одной плавки металла) заданных размеров. Кроме того, находили нормативный такт подачи транспортной пачки $T^{\text{н}}_{\text{тр.с}}$ (состоящей из числа слябов в зависимости от их толщины и грузоподъемности крана) от участка зачистки до участка нагрева к методической печи. При этом выполняли проверку условия $T^{\text{н}}_{\text{тр.с}} < T^{\text{н}}_{\text{нп}}$. Если условие не выполнялось, то в дальнейших расчетах принималось $T^{\text{н}}_{\text{ун}} = T^{\text{н}}_{\text{тр.с}}$.

Нормирование длительности подготовки слябов необходимо для планирования сменно-суточных заданий по бригадам и оценки степени их выполнения, для определения норм выработки, от которых зависит заработная плата рабочих-огнерезчиков.

## Оценка производительности на основе тактовых моделей

В результате моделирования работы каждой единицы оборудования в исследуемом листопрокатном цехе были определены технически возможные ($T^{\text{тв}}_{\text{об}j}$) и нормативные ($T^{\text{н}}_{\text{об}j}$) такты работы основного и вспомогательного оборудования для выбора единого такта работы жестко связанной производственной системы:

$$T^{\text{тв(н)}}_{\text{с}} = \max\left\{T^{\text{тв(н)}}_{\text{нп}}, T^{\text{тв(н)}}_{\text{п1}}, T^{\text{тв(н)}}_{\text{п2}}, T^{\text{тв(н)}}_{\text{лп}}, T^{\text{тв(н)}}_{d}, T^{\text{тв(н)}}_{\text{г}}\right\}, \text{ с},$$

которая включает последовательно осуществляемые процессы нагрева слябов в методических печах, прокатки сляба в черновой и раската в чистовой клети, правки его в роликоправильной машине и дальнейшей порезки на ножницах (дисковых — для обрезки продольных кромок, гильотинных — для резки листового раската на заданные длины по заказам). Фрагмент полученных результатов приведен в **табл. 1**.

Данные некоторых промежуточных расчетов приведены в **табл. 2**, **3** [1]. Общая схема формирования производительности листопрокатного цеха на основе тактового подхода показана на **рис. 2**. Результаты моделирования длительности производственных операций, циклов, тактов по сортаменту выпускаемой продукции выявили «узкие места» в работе вспомогательного оборудования, которые оказывают лимитирующее воздействие на основное оборудование (черновую клеть). Проведенный анализ расчетов показал, что «узкие места» в производственной системе являются «плавающими», т. е. возникают на разных участках в зависимости от сортамента (размеров) заказанных потребителями листов.

Для ликвидации «узких мест» рекомендовано разработать организационно-технические мероприятия, направленные на повышение пропускной способности вспомогательных участков до уровня, обеспечивающего максимально возможную производительность листопрокатного цеха.

На основе оценки тактов работы подсистем и системы в целом определяли технически возможные и нормативные производительности листопрокатного цеха по всему сортаменту, насчитывающему более 200 марко- и профилеразмеров листового проката (фрагмент приведен в табл. 2). Методика определения нормативных тактов работы основного и вспомогательного оборудования прокатного цеха изложена в работе [10].

Разработанная нормативная база показателей позволила определить нормативные коэффициенты трудности (более 200) по сортаменту выпускаемой продукции, которые вычисляли по формулам

$$k_{\text{тр}ij} = \frac{P^{\text{н}}_{\text{о}\gamma}}{P^{\text{н}}_{i\gamma}};\ P^{\text{н}}_{\text{о}\gamma} = \max\left\{P^{\text{н}}_{1\gamma}, ..., P^{\text{н}}_{i\gamma}, ..., P^{\text{н}}_{m\gamma}\right\},\ \text{т/ч},$$

где $P^{\text{н}}_{\text{о}\gamma}$, $P^{\text{н}}_{i\gamma}$ — нормативные часовые производительности цеха, соответствующие основной (базовой) и $i$-й продукции каждого размера листа с учетом γ-й марки стали.

За основной вид продукции, для которого $k_{\text{тр}ij} = 1$, принят лист размером 20×1500×6000 мм из стали 16ГС.

Предлагаемые нормативные коэффициенты трудности (сложности) для производства продукции листопрокатного цеха необходимы для определения плановых и прогнозных значений показателей производственной программы на месяц, квартал при использовании условно-натуральных (приведен-

Таблица 1

**Оценка технически возможных и нормативных тактов работы системы (листопрокатного цеха)**

| Размеры листа, мм, марка стали | Обозначение | Такт работы оборудования (подсистем), с | | | | | | | | Такт работы системы, с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | нагрев в печах, шт. | | | прокатка в клетях | | правка в машине | порезка на ножницах | | |
| | | 1 | 2 | 3 | черновой | чистовой | | дисковых | гильотинных | |
| 6000×1500×5 10ХСНД | $T^{тв}_{обj}$ | 98,50 | 49,25 | 32,83 | 44,91 | 64,93 | 50,77 | 53,45 | 44,51 | 64,93 |
| | $T^{н}_{обj}$ | 105,91 | 52,96 | 35,30 | 50,46 | 71,35 | 53,44 | 65,18 | 48,91 | 71,35 |
| 6000×1260×13 60–75Г | $T^{тв}_{обj}$ | 112,90 | 56,45 | 37,63 | 27,71 | 33,67 | 18,26 | 19,48 | 21,50 | 37,63 |
| | $T^{н}_{обj}$ | 121,39 | 60,70 | 40,46 | 30,78 | 37,00 | 19,22 | 22,40 | 23,63 | 40,46 |
| 4500×1400×9 ШХ15 | $T^{тв}_{обj}$ | 109,41 | 54,70 | 36,47 | 33,00 | 43,56 | 28,31 | 31,06 | 30,52 | 43,56 |
| | $T^{н}_{обj}$ | 118,92 | 59,46 | 39,64 | 37,07 | 47,87 | 29,80 | 36,54 | 33,54 | 47,87 |

Таблица 2

**Расчет технически возможной и нормативной производительности листопрокатного цеха (фрагмент)**

| Марки стали | Размеры листа, мм | | | Масса, т | | Кратность раската, ед. | Размеры сляба, мм | | | Такт работы системы, с | «Узкое место» | Производительность системы (цеха), т/ч | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | длина | ширина | толщина | листа | раската годного | | толщина | ширина | длина | | | технически возможная | нормативная |
| 10ХСНД | 6000 | 1500 | 5 | 0,353 | 1,059 | 3 | 140 | 700 | 1653 | 64,93 | Чистовая клеть | 58,75 | 53,47 |
| 60–75Г | 6000 | 1260 | 13 | 0,772 | 0,772 | 1 | 140 | 800 | 1031 | 37,63 | Печи | 73,80 | 68,60 |
| ШХ15 | 4500 | 1400 | 9 | 0,445 | 0,890 | 2 | 140 | 700 | 1487 | 43,56 | Чистовая клеть | 73,57 | 66,95 |

Таблица 3

**Технико-экономические показатели листопрокатного цеха**

| Показатели | Нормативные значения | | |
|---|---|---|---|
| | до реконструкции | после реконструкции | |
| | | № 1 | № 2 |
| Производительность цеха, т/ч | 68,5 | 91,9 | 74,5 |
| Прирост продукции, % | – | 35,5 | 9,5 |
| Себестоимость продукции, руб/т | 11 270,2 | 11 050,1 | 11 103,0 |
| Годовая экономия, млн руб. | – | 149,9 | 92,0 |
| Объем продаж, млн руб. | 7232,5 | 10 574,6 | 8573 |
| Прибыль, млн руб. | 2030,5 | 3044,7 | 2316 |
| Рентабельность продукции, % | 35 | 38 | 37 |
| Инвестиции, млн руб. | – | 110 | 17 |
| Срок окупаемости инвестиций, лет | – | 2,3 | 0,3 |

ных) единиц измерения объема производства, а также при расчете сортаментных калькуляций продукции и др.

### Пути повышения эффективности работы цеха

Далее рассмотрены организационно-технические мероприятия, направленные на повышение эффективности работы исследуемого листопрокатного цеха.

Организационные мероприятия не требуют капитальных вложений (за счет внедрения предлагаемых оптимальных режимов обжатий в клетях для сокращения цикла прокатки).

С целью определения оптимальных обжатий в черновой и чистовой группах клетей листопрокатного стана разработана математическая модель, исходными данными в которой являются размеры слябов (толщина, ширина, длина). Все расчеты начинаются с назначения первоначальных абсолютных режимов обжатий при прокатке от максимального, основанного на условиях захвата металла валками, а также ориентируясь на действительные обжатия в процессе работы операторов постов управления. После выбора обжатий программа рассчитывает все требуемые величины, необходимые для расчета конечной длины и ширины листов с учетом обрези. Если расчетные значения являются приемлемыми, то назначенные абсолютные обжатия считаются рациональными, если нет, то они корректируются, и цикл повторяется.

Разработанные оптимальные обжатия позволяют операторам поста управления рационально осуществлять процесс прокатки, тем самым сократив число пропусков и, следовательно, уменьшить цикл работы черновой и чистовой групп клетей и увеличить производительность листопрокатного цеха.

Организационно-технические мероприятия требуют капитальных вложений при внедрении предлагаемых технических решений для улучшения качества продукции.

На основании анализа технико-экономических показателей работы цеха, подробного изучения техники, технологии, организации производства, комплексных исследований на каждом участке цеха, а также проведенных модельных расчетов выявлено, что «узким (лимитирующим) местом» в цехе является чистовая клеть, которая имеет недостатки: малую жесткость валковой системы, повышенный износ среднего валка, необходимость применения подъемно-качающихся столов, ударные нагрузки в момент захвата раската при большой (постоянной) скорости вращения валков. Кроме того, клеть не отвечает требованиям по разнотолщинности готовой продукции. В процессе прокатки управление поперечной и продольной разнотолщинностью можно обеспечить повышением жесткости прокатной клети, а также профилированием бочки прокатных валков.

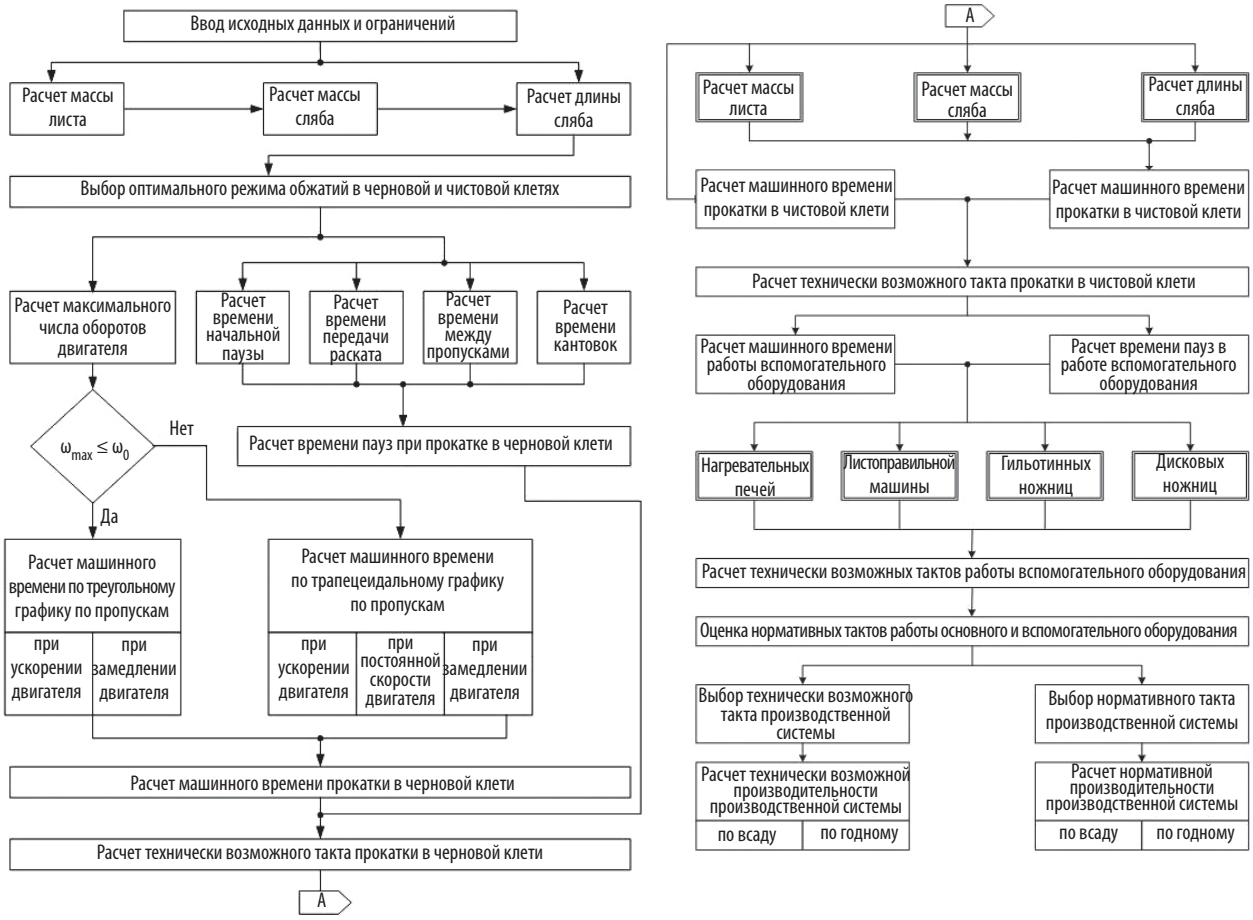


**Рис. 2.** Схема определения тактов работы и производительности листопрокатного цеха

В качестве примера предложены два варианта реконструкции действующего листопрокатного цеха с целью увеличения выпуска и улучшения качества готового проката.

Вариант 1 предлагает замену чистовой трехвалковой клети на новую четырехвалковую, что позволит улучшить качество горячекатаных листов по допускам на геометрические размеры и по механическим свойствам металла. Кроме того, появится возможность расширения сортамента выпускаемых листов по толщине и ширине, повысится надежность работы оборудования и улучшатся условия его эксплуатации. Четырехвалковая клеть состоит из двух рабочих и двух опорных валков. Поэтому за счет большой жесткости опорных валков, диаметр которых в 2,5–3 раза больше, чем у рабочих, прогиб их незначителен и профиль прокатываемой полосы будет иметь прямоугольное сечение с достаточно небольшой разнотолщинностью по ширине полосы.

Вариант 2 предлагает на существующей чистовой трехвалковой клети заменить валки с гладкой бочкой на профилированные эффективные S-образной формы с учетом использования системы осевой сдвижки валков. Профилировка валков должна обеспечить выпуск полос с минимальной поперечной разнотолщинностью, так как прокатка будет идти с повышенными обжатиями, увеличатся абсолютные обжатия в последних пропусках. Кроме того, профилировка должна способствовать устойчивому положению полосы в валках и повышению стойкости последних. Большое значение имеет также удобство выполнения профилировки на профилешлифовальном станке обычной конструкции.

Сравнительная оценка нормативных значений показателей двух рассматриваемых вариантов реконструкции представлена в табл. 3. Решение о выборе варианта реконструкции, которую целесообразно осуществить, принимает руководство предприятия.

В результате моделирования работы листопрокатного цеха определены и внедрены в производство оптимальные режимы обжатия слябов, что позволило операторам постов управления сократить длительность прокатки. Для рабочих-огнерезчиков предложены рациональные приемы и методы зачистки поверхности слябов, за счет чего сократилась длительность подготовки слябов к нагреву. Обоснованы нормативные коэффициенты использования оборудования, что дало возможность синхронизировать порезку раскатов на дисковых и гильотинных ножницах.

## Выводы

Разработанные нормативные модели позволили: выявить «узкие места»; осуществить прогнозирование показателей при изменении сортамента с учетом совершенствования технических средств и внедрения новой технологии; оценить эффективность работы цеха по ситуациям на основании сравнительного анализа отчетных и нормативных показателей производственной программы, себестоимости, прибыли и рентабельности продукции.

Следует отметить, что оптимально планировать процесс производства с учетом ситуаций можно даже при существующих в цехе технических и технологических диспропорциях путем корректировки последовательности выполнения заказов по сортаменту и определения необходимого числа функционирующих нагревательных печей. Например, для некоторых размеров готовых листов достаточно нагревать заготовки (слябы) не в трех, а двух методических печах, что позволяет снизить затраты на технологическое топливо и сократить издержки производства. Кроме того, в листопрокатном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» внедрены оптимальные режимы обжатий в черновой и чистовой клетях с целью сокращения цикла прокатки и повышения производительности, а также обоснованы нормативные коэффициенты трудности для расчета сортаментных калькуляций себестоимости продукции, что дало возможность улучшить технико-экономические показатели работы цеха.

В современных условиях актуальным являются изыскание и мобилизация организационно-экономических резервов предприятия, направленных на эффективное использование техники, технологий, повышение качества продукции, оптимальное планирование и оперативное управление производственным процессом. Предложенный подход применим для других листопрокатных цехов. ЧМ

## Библиографический список


1. *Фастыковский А. Р., Мартюшев Н. В., Мусатова А. И., Савченко И. А., Карлина А. И.* Обоснование нормативных моделей производительности листопрокатного цеха. Сообщение 1 // Черные металлы. 2024. № 1. С. 9–16.
2. *Edwards J. R., Boyns T., Matthews M.* Costing, pricing and politics in the British steel industry, 1918–1967 // Management Accounting Research. 2003. Vol. 14, Iss. 1. P. 25–49. DOI: 10.1016/S1044-5005(02)00033-1.
3. *Zheyuan Chen, Fiona Robinson, Ying Liu* et al. Characterizing strip snap in cold rolling process using advanced data analytics // Procedia CIRP24. 2019. Vol. 81. P. 453–458. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.078.
4. *Пелленин А. П.* Об использовании несимметричной прокатки для производства лент и полос // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 1. С. 87–93. DOI: 10.14529/met200110.
5. *Gulvir Singh, Pradeep K. Singh*. Improving the energy efficiency and process scrap in grooved hot rolling of SAE 52100 steel billets // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2023. Vol. 41. P. 55–68. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.014.
6. *Edwin Joseph R., Kanya N., Bhaskar K.* et al. Analysis on productivity improvement, using lean manufacturing concept // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45, Part 7. P. 7176–7182. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.412.
7. *Румянцев М. И., Завалищин А. Н.* Технологии производства листового проката и некоторые аспекты методологии их проектирования // Калибровочное бюро. 2019. Вып. 15. С. 13–23.
8. *Shenglong Jiang, Weigang Li, Chuanpei Xu* et al. An improved Pareto local search for solving bi-objective scheduling problems in hot rolling mills // Computers & Industrial Engineering. 2022. Vol. 172, Part A. 108561. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108561.
9. *Гизатулин Р. А., Мусатова А. И., Мартюшев Н. В., Валуев Д. В., Карлина А. И.* Разработка и применение нормативных тактовых моделей для модернизации электросталеплавильного цеха // Черные металлы. 2022. № 4. С. 10–16.
10. *Фастыковский А. Р., Мусатова А. И., Кулаков С. М., Мартюшев Н. В., Карлина А. И.* Разработка ситуационных моделей длительности производственных циклов изготовления партий готового проката. Сообщение 1 // Черные металлы. 2023. № 1. С. 44–51.
11. *Васильев А. А., Николаев В. А.* Новая технология горячей прокатки широкополосной стали // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. № 4. Т. 2. С. 5–10.
12. *Шепель А. А.* Совершенствование технологий и оборудования процесса прокатки на широкополосных станах первого поколения // Технологический аудит и резервы производства. 2014. № 5/1 (19). С. 46–51. DOI: 10.15587/2302-8372.2414.28097.
13. *Муравьева А. В., Калинина Н. Е.* Эффективность восстановления работоспособности прокатных валков методом бандажирования // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2016. № 4 (25). С. 101–103.
14. *Кулаков С. М., Мусатова А. И., Мартюшев Н. В., Карлина А. И.* Ситуационная оптимизация работы термического отделения с учетом нестабильности поступления заказов // Черные металлы. 2022. № 7. С. 58–63.


*"Chernye metally", 2024, No. 3, pp. 63–68*
*DOI: 10.17580/chm.2024.03.10*

**Feasibility demonstration of normative models for sheet-rolling shop productivity. Message 2**

***Information about authors***
**A. R. Fastykovsky**, Dr. Eng., Associate Prof., Head of the Dept. of Metal Forming and Metal Science [1], e-mail: fastikovsky@mail.ru;
**N. V. Martyushev**, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Materials Science [2], e-mail: martjushev@tpu.ru;
**A. I. Musatova**, Lecturer, Institute of Additional Education [1], e-mail: musatova-ai@yandex.ru;
**A. I. Karlina**, Cand. Eng., Researcher [3], e-mail: karlinat@mail.ru
[1] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
[2] Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.
[3] Moscow University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

**Abstract:** The problems of the rational functioning of rolling complexes are associated with the formation of performance standards using the proposed clock models of the operation of the main and auxiliary equipment, taking into account the product range. The procedure for constructing technically possible cycles of operation of auxiliary equipment for a specific sheet-rolling shop (methodical heating furnaces, straightening machine, disk and guillotine shears) is considered. In addition, the duration of the preparation of given batches of slabs for heating is substantiated, the cycles of supply from the transport bundle from the stripping section to the heating section to continuous furnaces are determined. A general scheme for the formation of the productivity of a sheet-rolling shop is presented. Fragments of the obtained results of technically possible and normative cycles of operation of the main and auxiliary equipment, as well as the productivity of the workshop are given in tabular form. At the same time, examples of identified "bottlenecks" in production processes are shown. The normative coefficients of difficulty (complexity) for the range of manufactured products are determined on the basis of the productivity standards of the sheet-rolling shop. Proposed organizational and technical measures aimed at improving the efficiency of the investigated sheet-rolling shop. The developed optimal modes of reduction in the roughing and finishing stands were implemented according to the product range. Based on the model calculations, it was revealed that the "bottleneck" in the workshop is mainly the finishing stand, which has many technical shortcomings. In this regard, two options for the reconstruction of the replacement of the finishing three-roll stand are proposed, which require capital investments. A comparative assessment of the standard values of technical and economic indicators for two reconstruction options is presented in tabular form, on the basis of which the decision to choose an option is made by the management of the enterprise.
**Key words:** clock models, auxiliary equipment, sheet-rolling shop, technically possible cycles, standards for stripping slabs, evaluation, productivity, reconstruction, efficiency of the shop.

**References**


1. Fastykovsky A. R., Martyushev N. V., Musatova A. I., Savchenko I. A., Karlina A. I. Feasibility demonstration of normative models for sheet-rolling shop productivity. Message 1. *Chernye Metally.* 2024. No. 1. pp. 9–16.
2. Edwards J. R., Boyns T., Matthews M. Costing, pricing and politics in the British steel industry, 1918–1967. *Management Accounting Research.* 2003. Vol. 14, Iss. 1. pp. 25–49. DOI: 10.1016/S1044-5005(02)00033-1.
3. Zheyuan Chen, Robinson F., Ying Liu et al. Characterizing strip snap in cold rolling process using advanced data analytics. *Procedia CIRP24.* 2019. Vol. 81. pp. 453–458. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.078.
4. Pellenin A. P. On the use of asymmetrical rolling for the production of strips and bands. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya".* 2020. Vol. 20. No. 1. pp. 87–93. DOI: 10.14529/met200110.
5. Gulvir Singh, Pradeep K. Singh. Improving the energy efficiency and process scrap in grooved hot rolling of SAE 52100 steel billets. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.* 2023. Vol. 41. pp. 55–68. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.014.
6. Edwin Joseph R., Kanya N., Bhaskar K. et al. Analysis on productivity improvement, using lean manufacturing concept. *Materials Today: Proceedings.* 2021. Vol. 45. Part 7. pp. 7176–7182. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.412.
7. Rumyantsev M. I., Zavalishchin A. N. Technologies for production of sheet metal and some aspects of the methodology for design thereof. *Kalibrovochnoe byuro.* 2019. Iss. 15. pp. 13–23.
8. Shenglong Jiang, Weigang Li, Chuanpei Xu et al. An improved Pareto local search for solving bi-objective scheduling problems in hot rolling mills. *Computers & Industrial Engineering.* 2022. Vol. 172, Part A. 108561. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108561.
9. Gizatulin R. A., Musatova A. I., Martyushev N. V., Valuev D. V., Karlina A. I. Development and application of normative timing models for the modernization of an electric steel-smelting shop. *Chernye Metally.* 2022. No. 4. pp. 10–16.
10. Fastykovsky A. R., Musatova A. I., Kulakov S. M., Martyushev N. V., Karlina A. I. Development of situation models for duration of production cycles of manufacturingfinished rolled products. Message 1. *Chernye Metally*. 2023. No. 1. pp. 44–51.
11. Vasiliev A. A., Nikolaev V. A. New technology for hot rolling of wide-band steel. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2013. No. 4. Vol. 2. pp. 5–10.
12. Shepel A. A. Improvement of technologies and equipment for the rolling process on first-generation broadband mills. *Tekhnologicheskiy audit i rezervy proizvodstva.* 2014. No. 5/1 (19). pp. 46–51. DOI: 10.15587/2302-8372.2414.28097.
13. Muravyova A. V., Kalinina N. E. Efficiency of restoring the performance of rolling rolls using roll sleeve method. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU)*. 2016. No. 4 (25). pp. 101–103.
14. Kulakov S. M., Musatova A. I., Martyushev N. V., Karlina A. I. Situational optimization of the work of thermal department, taking into account the ordering instability. *Chernye Metally.* 2022. No. 7. pp. 58–63.