

Черные металлы

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 1 (1105), январь 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» 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: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 1 (1105), январь 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: 08.02.2024. Формат 60х90/8.

Печ. л. 11. Offsetная печать. Бумага offsetная.

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



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное производство

- А. В. Чайкин, В. А. Чайкин. Улучшение группы качества ответственных железнодорожных отливок из стали 110Г13Л на Муромском стрелочном заводе 4

Прокатка и другие процессы ОМД

- А. Р. Фастыковский, Н. В. Мартюшев, А. И. Мусатова, И. А. Савченко, А. И. Карлина. Обоснование нормативных моделей производительности листопрокатного цеха. Сообщение 1 9
- Н. А. Чиченев, А. О. Карфидов, М. В. Васильев, О. Н. Чиченева. Определение параметров ступенчатой гибки тонколистового металла 17

60 лет кафедре металлургического оборудования Липецкого ГТУ

- А. П. Жильцов, А. Л. Челядина. Научная и образовательная деятельность кафедры металлургического оборудования в Липецком государственном техническом университете 21
- Д. А. Власенко, А. А. Харитоненко, А. В. Бочаров, А. Л. Челядина, М. А. Шипулин. Анализ влияния износа рабочих органов на эффективность процесса дробления в молотковой дробилке 26
- Д. А. Власенко, А. П. Жильцов, Р. С. Мележик, А. А. Харитоненко. Комплексный подход к улучшению качества твердого топлива в агломерационном производстве за счет усовершенствования четырехвалковой дробилки ДЧГ 900х700. 32
- А. В. Галкин, А. А. Харитоненко, Л. С. Чернышова, А. В. Бочаров. Оптимальное планирование технического обслуживания и ремонтов многокомпонентных устройств в черной металлургии. ... 38
- А. П. Жильцов, Э. П. Левченко, О. И. Акимова, Д. А. Власенко. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторно-ударного измельчителя стальной колотой дробы. 46

Термообработка и нанесение покрытий

- В. Г. Шморгун, В. П. Кулевич, А. И. Богданов. Влияние термообработки сплава Х15Ю5 с алюминидным покрытием на его тепло- и электропроводность 52

Термообработка и металловедение

- Е. А. Голи-Оглу. Структура и свойства сварного соединения толщиной 132 мм из низкоуглеродистой микролегированной Nb и Nb+Ti стали после ТМО 58

10 лет объединенной кафедре «Металлургические технологии и оборудование» НГТУ им. Р. Е. Алексеева

- Е. И. Яровая, И. О. Леушин, А. Ю. Гусев. Управление режимами формирования отливки «ступица» из стали 30ХНМЛ в песчано-глинистых формах и формах из холоднотвердеющих смесей 67
- А. Н. Грачев, И. О. Леушин, В. А. Коровин, Л. И. Леушина. Применение промышленных отходов в литейно-металлургических технологиях. Опыт кафедры металлургических технологий и оборудования 73
- А. С. Романов, М. А. Гейко, О. И. Чеберяк, Д. С. Маргун. О возможностях и перспективах кафедры металлургических технологий и оборудования в подготовке специалистов по аддитивным технологиям в производстве чугунного и стального литья 79

Экономика и финансы

- В. Г. Когденко, Н. А. Казакова. Ситуационный анализ деловой активности компаний черной металлургии с позиций институционального подхода 83

К 70-летию Сергея Павловича Галкина. III стр. обл.

Г. Г. Григорян 66

Обоснование нормативных моделей производительности листопрокатного цеха. Сообщение 1

А. Р. Фастыковский, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и металловедения ЕВРАЗ ЗСМК¹, докт. техн. наук, доцент, эл. почта: fastikovskiy@mail.ru

Н. В. Мартюшев, доцент отделения материаловедения², канд. техн. наук, доцент, эл. почта: martjushev@tpu.ru

А. И. Мусатова, преподаватель института дополнительного образования¹, эл. почта: musatova-ai@yandex.ru

И. А. Савченко, профессор³, докт. социол. наук, доцент, эл. почта: Savchenko-514@mgpu.ru

А. И. Карлина, научный сотрудник⁴, канд. техн. наук, эл. почта: karlinat@mail.ru

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

² Томский политехнический университет, Томск, Россия.

³ Московский городской педагогический университет, Москва, Россия.

⁴ Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

Для решения ряда производственных, экономических, организационно-логистических и оперативно-управленческих задач необходима информационная нормативная база показателей, адекватная к использованию в различные периоды функционирования действующих прокатных цехов. К таким периодам относят: планирование и фактическую работу цеха, реконструкцию, модернизацию и совершенствование новых технологий. Все эти периоды должны сопровождаться анализом и быстрой перестройкой информационно-нормативной базы, в которой первоочередной задачей является обоснование производительности цеха. При этом во многих случаях имеется недостаточно обоснованная методика определения нормативов производительности прокатных цехов для заданного сортамента, что приводит к неэффективному использованию оборудования из-за непредусмотренных простоев металла на разных стадиях обработки, увеличению длительности циклов, снижению производительности прокатных цехов. Показаны значительная роль производительности как индикатора эффективности работы прокатных цехов и взаимосвязь с технико-экономическими показателями. Отмечен главный недостаток применяемого расчета производительности прокатных цехов с последовательной структурой участков, в каждом из которых определяют частные производительности, а затем выбирают из них наименьшее значение. При этом возникают сложности с получением достоверных данных о расходных коэффициентах металла по участкам. В связи с этим предложенная модель обоснования производительности цеха имеет ряд преимуществ: соответствует тактовому подходу и возможности использования общего расходного коэффициента металла из доступной учетной информации. Проведенные комплексные исследования и анализ полученных данных в листопрокатном цехе позволили сформировать алгоритм нормативной производительности цеха на основе тактового подхода. Приведены модели рациональных режимов обжатий, процессов прокатки, технически возможных тактов работы черновой и чистовой клети для заданного сортамента. Показаны примеры полученных значений исходя из требуемых размеров готовых листов и выбранных сечений слябов.

Ключевые слова: производительность, такты, листопрокатный цех, черновая и чистовая клети, рациональные режимы обжатий, модели, алгоритмы.

DOI: 10.17580/chm.2024.01.02

Введение

В практике оперативного планирования производства проката информационным источником нормативов интенсивного использования оборудования обычно принимают среднюю фактически достигнутую производительность цеха. При этом «осредняют» возможные производственные ситуации и не выполняют структурно-динамические расчеты загруженности основного и вспомогательного оборудования в течение планового периода [1–4].

В действующих прокатных цехах имеются определенные трудности, препятствующие созданию ситуационных норм производительности. В связи с этим предлагается использовать более точные расчетно-аналитические методы обоснования нормативов производительности, основанные на микроэлементном техническом нормировании, инженерных расчетах и имитационном моделировании [5–7].

По результатам комплексных исследований и анализа функционирования нескольких листопрокатных цехов металлургических предприятий выявлено, что фактическая работа цехов, участков имеет некоторые недостатки как в оперативном управлении производственными процессами, так и в календарном планировании, включая составление заданий, планов-графиков на кратко- и долгосрочный периоды. В основном это связано с недостаточно обоснованной нормативной базой производительности, что не дает возможность рационально планировать, прогнозировать по вариантам, ситуациям и оценивать реальное выполнение производства продукции.

Производительность цеха предложено классифицировать в рамках следующего признакового множества по: области применения (технически возможная, нормативная, плановая, фактическая); единичному интервалу времени

(часовая, сменная, суточная, за месяц, год); сортаменту (видам) продукции; ситуациям. Производительность следует оценивать на всех стадиях жизненного цикла с использованием математического моделирования технологических процессов (концептуальная проработка, проектирование, строительство, эксплуатация) [8–11].

Одним из важнейших параметров при определении производительности прокатного цеха является такт его работы, поэтому в данной работе с целью обоснования нормативных моделей производительности рассмотрена процедура моделирования тактов производственных процессов на конкретном объекте [12].

Производительность, характеризующая эффективность функционирования прокатных цехов

Производительность прокатного цеха (системы) целесообразно интерпретировать как индикатор эффективности функционирования человеко-технического комплекса, осуществляющего преобразование полуфабрикатов в готовые изделия (продукцию). На производительность цеха влияют как внешние, так и внутренние (многоуровневые) факторы. В свою очередь, производительность прокатных цехов оказывает значительное воздействие на технико-экономические показатели (рис. 1).

Далее приведены основные формулы для определения производительности по областям применения.

Технически возможную, нормативную, плановую производительность системы рассчитывают с учетом сортамента и единичного интервала времени:

- производительность цеха i -го вида продукции:

$$p_i^{(тв, н, пл)} = \frac{G_i}{T_{ci}^{тв, н, пл} \cdot k_{pi}^{тв, н, пл}}, \text{ т/ч}, \quad (1)$$

где G_i — масса i -го вида материала, т; $T_{ci}^{тв, н, пл}$ — такт работы системы технически возможный, нормативный, плановый для i -й продукции, ч; $k_{pi}^{тв, н, пл}$ — удельный расход материала (расходный коэффициент), соответствующий перечисленным выше тактам, т/т;

– средняя производительность цеха для заданного сортамента продукции:

$$p_{ср}^{тв, н, пл} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_s}{\sum_{i=1}^s \frac{a_i}{p_i^{тв, н, пл}}}, \text{ т/ч}, \quad (2)$$

где $a_1, \dots, a_s$ — доли i -й продукции в общем объеме производства;

– средняя производительность цеха для заданного сортамента за определенный период времени (смена, сутки, месяц, год):

$$p_{ср.см(сут,мц,г)}^{н,пл} = p_{ср}^{н,пл} \cdot \PhiВ_{см(сут,мц,г)}^{н,пл} = ВП_{см(сут,мц,г)}^{н,пл} \cdot T, \quad (3)$$

где $\PhiВ_{см(сут,мц,г)}^{н,пл}$ — фонд времени работы цеха (нормативный, плановый) за смену (сутки, месяц, год), ч.

Рассчитанная таким образом средняя производительность соответствует выпуску продукции ВП (нормативная, плановая).

Производительность цеха с последовательной структурой подсистем обычно определяют через их произво-

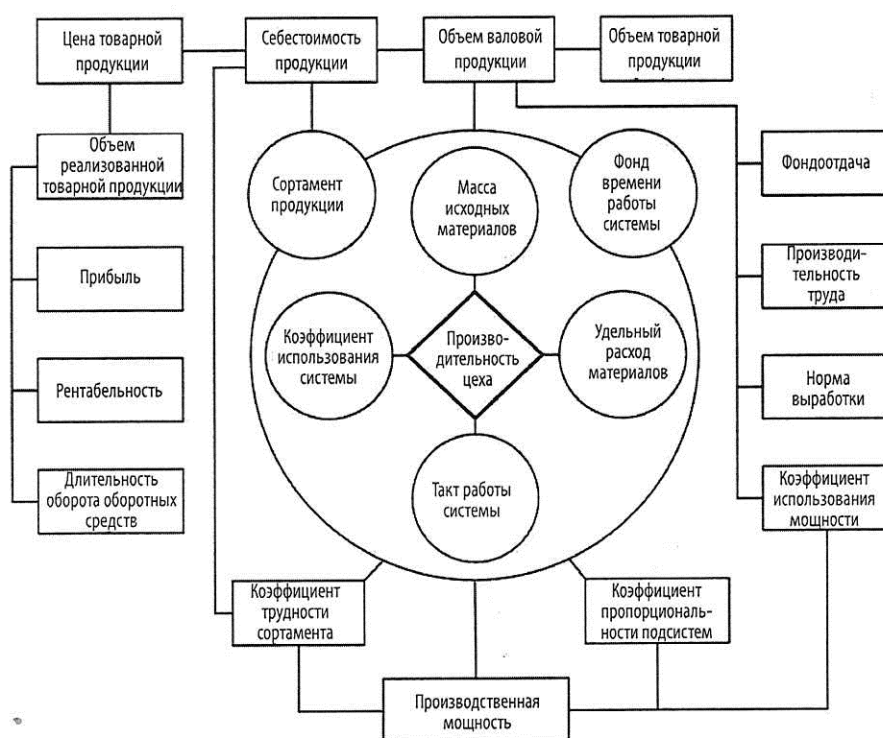


Рис. 1. Взаимосвязи производительности прокатных цехов с технико-экономическими показателями

длительности $P_{ппс1}, P_{ппс2}, \dots, P_{ппсy}$, которые сравнивают между собой, а затем выбирают из них наименьшее значение.

Основным недостатком расчета производительности цеха по формуле (4) является необходимость предварительной оценки производительности каждой подсистемы, при вычислении которой возникают трудности не только с оценкой тактов работы подсистем $T_{ппс1}, T_{ппс2}, T_{ппсy}$, но и с получением достоверных данных подсистемных расходных коэффициентов соответствующих материалов.

$$P_{пс} = \min \left\{ P_{ппс1} = \frac{G_{ппс1}}{T_{ппс1} \cdot k_p^{ппс1}}; P_{ппс2} = \frac{G_{ппс2}}{T_{ппс2} \cdot k_p^{ппс2}}; \dots; P_{ппсy} = \frac{G_{ппсy}}{T_{ппсy} \cdot k_p^{ппсy}} \right\} \quad (4)$$

Формулу (4) можно эквивалентно преобразовать в выражение, в котором удельные расходы материалов (расходные коэффициенты) подсистем (участков) представлены следующим образом:

$$k_p^{ппс1} \cdot k_p^{ппс2} \cdot \dots \cdot k_p^{ппсy} = k_p^{пс}$$

Предложена нормативная модель оценивания производительности сложной производственной системы (без предварительных расчетов производительностей подсистем и соответствующих расходных коэффициентов) [13, 14].

Модель производительности цеха рекомендовано определять через такты работы участков и общий расходный коэффициент материалов $k_p^{пс}$ системы:

$$P_{пс} = \frac{G_{ппс1}}{\max \{T_{ппс1}, T_{ппс2}, \dots, T_{ппсy}\} \cdot k_p^{пс}} \quad (5)$$

Предлагаемая формула (5) соответствует тактовому подходу к оценке производительности человеко-технических систем, который необходимо применять при анализе, планировании и выборе вариантов модернизации действующих цехов.

Методика и объект исследования

В качестве объекта исследования выбран листопрокатный цех АО «ЕВРАЗ ЗСМК», который представляет сложную производственную систему, включающую агрегаты и участки, работающие в жесткой взаимосвязи между собой для обеспечения бесперебойного и ритмичного выпуска проката в соответствии с заказами потребителей.

Производственный процесс в цехе начинается с поступления слябов на склад, откуда их передают в методические нагревательные печи. После нагрева слябы прокатывают последовательно в черновой и чистовой клетях. Затем раскаты правят в листопрямительной машине, подают на дисковые ножницы для обрезки продольных кромок и на гильотинные ножницы для порезки на мерные длины. Готовые листы маркируют и пакетируют для отправки на склад готовой продукции. Схема организации материальных потоков листопрокатного цеха представлена на рис. 2.

Проведенные хронометражные наблюдения за работой клетей листопрокатного стана показали, что ведущей из них является черновая клеть, ритму которой подчинены все сопряженные участки (нагрева, правки, порезки). Черновая клеть, с одной стороны, диктует темп работы всей производственной системе, а с другой — воспринимает все сбои, остановки, возникающие на любом из этих участков и в конечном счете определяет производительность листопрокатного цеха.

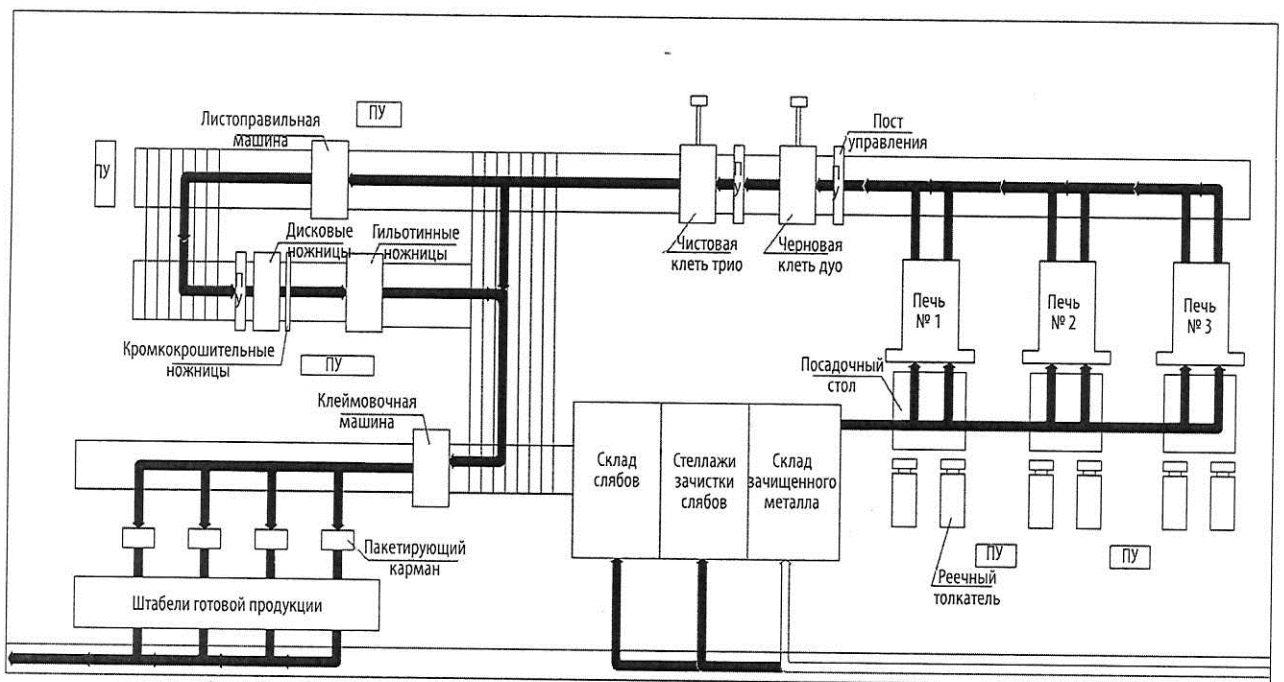


Рис. 2. Схема организации материальных потоков листопрокатного цеха

Далее методика оценивания тактов работы основного оборудования листопркатного цеха рассмотрена и проиллюстрирована на примере прокатки слэбов для получения листов размером 6000×1500×5 мм из стали 10ХСНД.

Определение тактов работы основного оборудования

Листопркатный стан состоит из двух последовательно расположенных клеток: черновой двухвалковой и чистовой трехвалковой.

В каждой клетке одновременно прокатывается только один слэб (раскат), т. е. процесс прокатки протекает последовательно без перекрытия во времени, поэтому цикл прокатки равен такту прокатки (такту работы клетки).

Основными факторами, влияющими на длительность цикла прокатки ($T_{\text{ц}}$), являются: число пропусков (n^*), масса

слэба (G_c), размеры слэба (D_c) и готового листа (D_n), длительность технологически неизбежных задержек (τ_r), т. е. $T_{\text{ц}} = F(n^*, G_c, \tau_r, D_c, D_n)$; $T_{\text{ц}} = T_n$.

Структура такта работы каждой клетки имеет вид

$$T_n = \sum_{n=1}^{n^*} t_m(n) + T_b, \quad (6)$$

где $t_m(n)$ — машинное время прокатки для n -го пропуска, с; T_b — вспомогательная продолжительность прокатки для цикла из n пропусков, с.

Вспомогательная длительность включает паузы (задержки), необходимые в процессе прокатки слэба (раската), и определяется скоростью работы вспомогательных механизмов клетки (нажимного устройства, рольгангов, манипуляторов), а также применяемыми способами (приемами) работы операторов-технологов. Декомпозиционная

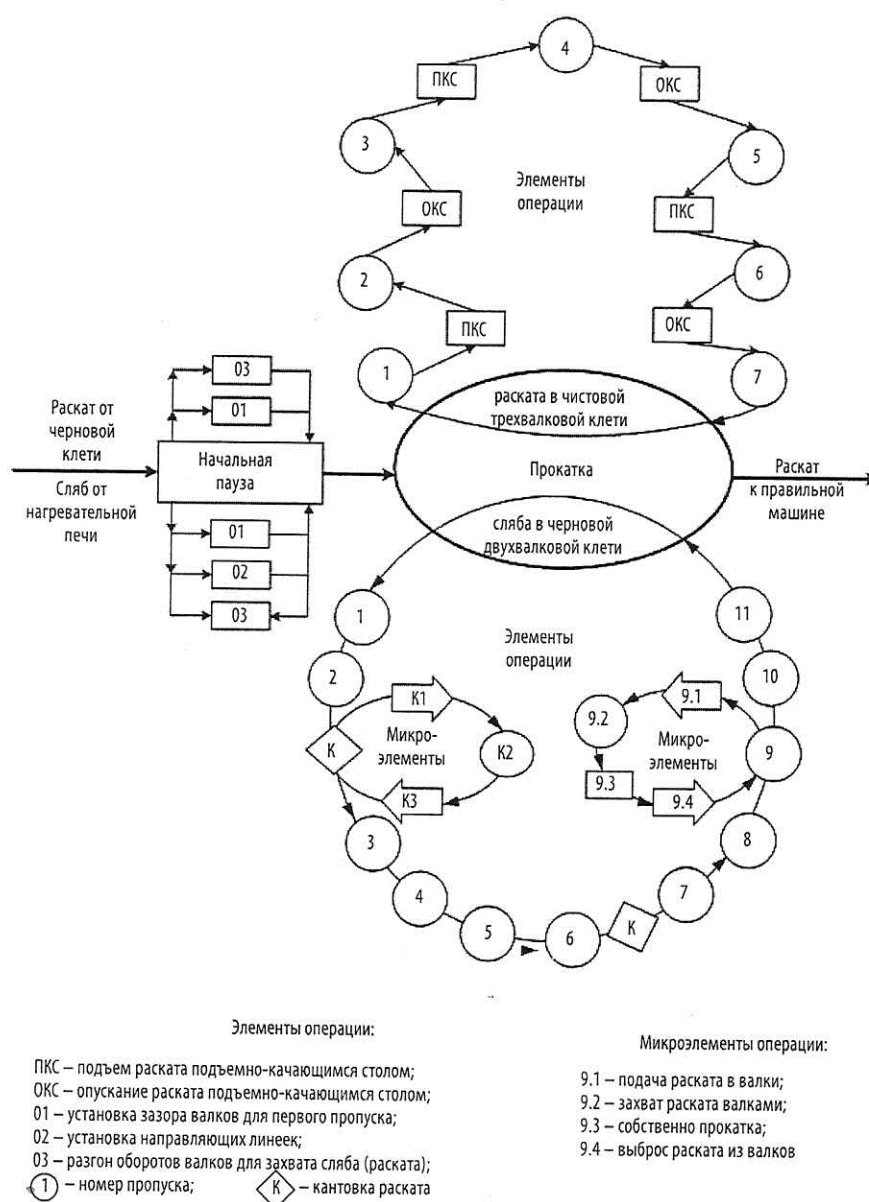


Рис. 3. Схема декомпозиции процесса прокатки слэба в рабочих клетях

схема процесса прокатки в черновой и чистовой клетях показана на рис. 3, на основе которой построена следующая процедура расчета технически возможных (затем нормативных) тактов работы прокатного оборудования исходя из требуемых размеров готового листа и выбранного сечения сляба.

1. Расчет длины сляба.

Для определения машинного времени прокатки рассчитывали номинальную длину сляба:

1.1. Масса одного листа по годовому при заданных его размерах

$$G_n = h_n \cdot b_n \cdot l_n \cdot \gamma = 0,005 \cdot 1,5 \cdot 6 \cdot 7,85 = 0,353 \text{ т,}$$

где h_n , b_n , l_n — толщина, ширина и длина готового листа соответственно, м; γ — плотность стали, т/м³.

1.2. Масса раската по годовому с учетом кратности n_k его раскроя:

$$G_p = G_n \cdot n_k = 0,353 \cdot 3 = 1,059 \text{ т.}$$

1.3. Масса (G_c) и длина (L_c) сляба составят:

$$G_c = G_p \cdot K_p = 1,059 \cdot 1,2 = 1,271 \text{ т;}$$

$$L_c = \frac{G_c}{h_c \cdot b_c \cdot \gamma} = \frac{1,271}{0,14 \cdot 0,7 \cdot 7,85} = 1,653 \text{ м,}$$

где K_p — норма расхода сляба на лист, т/т; h_c , b_c — толщина и ширина сляба соответственно, м.

2. Определение рациональных режимов обжатий.

С целью определения оптимальных режимов обжатий слябов изучали существующие в цехе технологические параметры работы клетей при стабильном процессе прокатки, затем составляли предварительные режимы обжатий по пропускам, которые в процессе моделирования корректировали.

Критерием оптимизации и ограничениями при расчете режимов обжатий являлись:

- минимальное число пропусков;
- минимальное число кантовок;
- кантовка в черновой клетке, которая назначается

в зависимости от ширины раската b_p с учетом припуска на обрезку кромок, длины бочки вала l_b , если $b_p \geq l_b$, то проводят кантовку раската на 90 град.;

– проверка соответствия полученных размеров раската (ширина и длина) после чистовой клетки заданным размерам листа с учетом припуска на температурный режим металла, длины готового раската $L_p = l_n \cdot n_k$ и минимального отклонения обрезки в раскате от ее нормативного значения;

– рациональная загрузка привода двигателя прокатной клетки (назначенные обжатия не должны перегружать двигатель).

На основании анализа действующей системы, известных методов расчета и полученного экспериментального материала разработаны имитационные модели процесса прокатки в черновой и чистовой клетях, позволяющие рассчитывать оптимальные режимы обжатий, основанные на следующих соотношениях:

$$b_n = b_{n-1} + \Delta b_n; \Delta b_n = 0,4 \frac{\Delta h_n}{h_{n-1}} \cdot L_d; \quad (7)$$

$$\epsilon_n = \frac{\Delta h_n}{h_{n-1}} \cdot 100\%; L_d = \sqrt{\Delta h_n R_k},$$

где b_n — ширина раската после n -го пропуска, мм; Δh_n — абсолютное обжатие в n -м пропуске, мм; h_{n-1} — высота раската в предшествующем пропуске, мм; ϵ_n — относительное обжатие в n -м пропуске; L_d — длина дуги захвата металла валками, мм; R_k — катающий радиус, мм.

Длина L_n раската в n -м пропуске, мм:

$$L_n = L_{n-1} \cdot \mu_n; \mu_n = \frac{h_{n-1}}{h_n}; h_n = h_{n-1} - \Delta h_n. \quad (8)$$

При расчете режимов обжатий учитывали, что последние два или три пропуска в чистовой клетке для некоторых марок стали должны быть проглаживающими. При определении размеров раската принятые соотношения корректировали с учетом допусков на обрезь. Для определения режимов обжатий слябов рассматривали варианты режимов обжатий по пропускам, которые в процессе моделирования корректировали. Кроме этого, выполняли расчеты энергосиловых параметров по пропускам при выбранной схеме обжатий. Если расчетная мощность электродвигателя

Таблица 1

Результаты режима обжатия и длины раската (размеры листа — 6000×1500×5 мм; марка стали — 10ХСНД)

Показатель	Черновая прокатная двухвалковая клеть							Чистовая прокатная трехвалковая клеть				
	0	1	2 к*	3	...	12	13	1	2	...	6	7
Номер пропуска	0	10	10	20	...	4	3	2,5	2	...	1,5	1,2
Абсолютное обжатие, мм	0	7,0	7,6	16,4	...	19,0	17,6	17,9	17,4	...	19,2	19,0
Относительное обжатие, %					...	17	14	11,5	9,5	...	6,3	5,1
Толщина раската, мм	140	132	122	102	...	41,23	35,71	32,60	29,15	...	25,25	22,58
Длина дуги захвата, мм		65,19	65,19	92,20	...					...		
Коэффициент вытяжки		1,07	1,08	1,19	...	1,23	1,21	1,22	1,21	...	1,24	1,24
Уширение, мм		1,084	1,98	6,05	...	3,14	2,52	0,00	0,00	...	0,00	0,00
Ширина раската, мм	700	702	704	1920	...	1649	1651	1651	1651	...	1651	1651
Длина раската, мм	1653	1774	1914	839	...	5862	7107	8652	10 473	...	15 793	19 509

к* — кантовка раската после пропуска.

Таблица 2

Расчет машинного времени прокатки в черновой клети (размеры листа — 6000×1500×5 мм)

Показатель	Номер пропуска								
	1	2 к	3	5	6 к	7	...	12	13
Длина раската, мм	1774	1914	839	1269	1629	2287	...	5862	7107
Обороты двигателя $\omega_{\max}$, об/мин	52,01	53,34	42,09	46,92	50,60	56,73	...	82,40	89,63
Обороты двигателя ω_p , об/мин	52,01	53,34	42,09	46,92	50,60	56,73	...	58,00	58,00
Скорость прокатки, м/с:									
при разгоне	1,602	1,631	1,381	1,488	1,570	1,707	...	1,735	1,735
постоянная	0	0	0	0	0	0	...	2,580	2,580
при замедлении	2,047	2,076	1,826	1,933	2,015	2,152	...	2,180	2,180
Машинное время прокатки, с:									
при скорости разгона	0,800	0,834	0,552	0,673	0,765	0,918	...	0,950	0,950
при постоянной скорости	0	0	0	0	0	0	...	1,329	1,812
при скорости замедления	0,240	0,267	0,042	0,138	0,212	0,335	...	0,360	0,360
Итого машинное время	1,041	1,100	0,594	0,811	0,977	1,253	...	2,639	3,122

Таблица 3

Расчет технически возможных тактов прокатки в черновой и чистовой клетях

Размер листа, мм			Черновая клеть					Чистовая клеть				
длина	ширина	толщина	число пропусков, шт.	длина раската после клетки, мм	длительность, с	такт прокатки в клетях, с	число пропусков, шт.	длина раската после клетки, мм	длительность, с	такт прокатки в клетях, с	число пропусков, шт.	длина раската после клетки, мм
6000	1500	5	13	7107	19,33	25,58	44,91	7	19 509	43,35	21,58	64,93
4500	1400	9	11	4789	13,18	19,82	33,00	7	15 520	23,39	21,17	43,56
6000	1260	13	9	3179	9,20	18,51	27,71	7	6503	14,45	19,22	33,67

превышала его номинальную мощность, то проводили перераспределение режима обжатия в сторону уменьшения. Пример расчета режимов обжатия и длины раската по пропускам для листов марки стали 10ХСНД приведен в табл. 1.

3. Расчет такта работы черновой клетки.

Такт прокатки в черновой двухвалковой клети T_n^1 определяли по формуле (1).

Клеть реверсивная, работает с переменным направлением вращения прокатных валков. Машинное время прокатки в каждом пропуске характеризуется продолжительностью пребывания прокатываемого металла в валках клетки, определяется длиной раската и скоростью прокатки. На реверсивных станах скорость прокатки каждого пропуска является переменной величиной. Это связано с необходимостью надежного захвата металла валками при наиболее выгодном числе их оборотов после реверса, с разгоном двигателя до определенного максимального числа оборотов (с целью сокращения затрат машинного времени прокатки) и замедлением двигателя к концу пропуска (во избежание чрезмерного выброса раската из валков и для достижения короткого времени реверсирования). Предварительно проводили декомпозицию операции прокатки на элементы и микроэлементы (см. рис. 3). При расчете такта прокатки использовали общепринятую схему изменения скорости во времени для пропуска в процессе одного цикла вращения валков (от начала вращения до их остановки).

Машинное время одного пропуска в общем виде состоит из трех периодов:

$$t_m = t_m^1 + t_m^2 + t_m^3$$

где t_m^1, t_m^2, t_m^3 — машинное время при разгоне, при постоянной скорости и при замедлении двигателя соответственно, с.

Время одного пропуска рассчитывали по формуле

$$t = \frac{\omega_2 - \omega_1}{a} + \frac{\omega_2 - \omega_3}{b} + \frac{L_p - (L_1 + L_3)}{V_2}, \quad (9)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — обороты валков в момент захвата раската, в период постоянной скорости и в момент выхода раската из валков соответственно, об/мин; a, b — среднее ускорение двигателя в период разгона и замедления соответственно, об/мин/с; L_p — полная длина раската, м; L_1, L_3 — части длины раската, прокатанные за один пропуск при разгоне и замедлении валков соответственно, м; V_2 — скорость прокатки при установившемся процессе, м/с.

$$V_2 = \frac{\pi D_k \cdot \omega}{60}; \omega = \frac{\omega_0}{r}, \quad (10)$$

где D_k — катающий диаметр бочки валков, м; ω — обороты валков, об/мин; ω_0 — число оборотов электродвигателя, об/мин; r — передаточное число редуктора.

Значения L_1, L_3 определяли по формулам

$$L_{1(3)} = V_{1(3)} \cdot t_{1(3)}; V_{1(3)} = \frac{\pi D_k \cdot (\omega_2 + \omega_{1(3)})}{2 \cdot 60}, \quad (11)$$

где $V_{1(3)}$ — скорость прокатки при разгоне или замедлении, м/с.
Максимальное число оборотов валков в пропуске:

$$\omega_{\max} = \sqrt{60 \frac{2(a \cdot b)}{a+b} \cdot \left(\frac{L_p}{\pi D_k} + \frac{\omega_1^2}{120a} + \frac{\omega_3^2}{120b} \right)}. \quad (12)$$

Если $\omega_{\max} > \omega_0$, то в расчетах принимали $\omega_2 = \omega_0$, ω_0 — основные (номинальные) обороты двигателя, об/мин. Значения ω_1 и ω_3 выбирали в зависимости от минимальных пауз между пропусками. Значение ω_2 зависит от ω_1 и ω_3 .

Режим прокатки в каждом пропуске на черновой реверсивной клети осуществляют по двум графикам: трапецидальному и треугольному (табл. 2). Чем больше обороты на ускорении и замедлении и чем меньше период прокатки с постоянным числом оборотов, тем меньше машинное время данного пропуска.

Вспомогательное время прокатки включает технически неизбежные паузы, определяемые скоростью работы механизмов нажимного устройства, рольгангов, манипуляторов и поворотного стола:

$$T_b = \tau_0 + t_{\text{ппр}} + \sum_{i=1}^{n-1} \tau'_b + \sum_{i=1}^K \tau''_b, \quad (13)$$

где τ_0 — продолжительность начальной паузы, с; $t_{\text{ппр}}$ — время передачи раската по рольгангу к валкам, с; τ'_b — пауза между смежными пропусками, с; τ''_b — время кантовки раската на 90 град.

Следует отметить, что продолжительность начальной паузы зависит от длительности подъема верхнего валка и перемещения линеек манипулятора в исходное положение, а также времени, необходимого для изменения оборота валков и направления их вращения от момента выброса прокатанной полосы до момента захвата сляба.

Длительность указанных операций совмещается, и начальная пауза определяется продолжительностью подъема верхнего валка как наиболее длительной из вспомогательных операций:

$$\tau_0 = \frac{\Delta H}{V_{\text{вв}}} + \frac{V_{\text{вв}}}{a_{\text{вв}}}, \quad (14)$$

где ΔH — перемещение верхнего валка, мм; $V_{\text{вв}}$ — скорость перемещения валка, мм/с; $a_{\text{вв}}$ — ускорение при перемещении валка, мм/с².

Для пауз, связанных с кантовкой, решающими факторами, влияющими на их продолжительность, являются скорость выброса раската из валков и его длина, а также скоростной режим работы рольгангов:

$$\tau''_b = \frac{L_n}{V_p} + \tau_{\text{к}}, \quad (15)$$

где $\tau_{\text{к}}$ — время собственно кантовки (на основе обработки хронометражных наблюдений), с.

Время реверсирования рабочих валков зависит от скорости выхода раската из предыдущего пропуска (ω_3), от скорости входа в последующий пропуск (ω_1) при постоянном ускорении (a) и замедлении (b), следовательно

$$\tau'_b = \frac{\omega_3}{b} + \frac{\omega_1}{a}. \quad (16)$$

В процессе работы реверсивных станов паузы, зависящие главным образом от используемых приемов работы операторов стана, определяли длительностью работы нажимного устройства.

Технически возможный такт прокатки в черновой клети для рассматриваемого примера составляет $T_{\text{н1}}^{\text{тв}} = 44,91$ с (табл. 3).

4. Расчет такта работы чистовой клети.

Такт прокатки в чистовой трехвалковой клети рассчитывали по формуле

$$T_n^2 = \sum_{i=1}^n t_m^o + \sum_{i=1}^n t_m^{\delta} + \tau_0 + \tau_c + \tau_{\text{тр}}, \quad (17)$$

где t_m^o, t_m^{δ} — машинное время прокатки, соответственно, с обжатием и без обжатия в одном пропуске (пропуск без обжатия служит в основном для проглаживания листа); $\tau_0, \tau_c, \tau_{\text{тр}}$ — продолжительность начальной паузы, подъема стола, пауз между пропусками соответственно, с.

Машинное время непрерывно работающей чистовой клети в каждом пропуске при постоянной скорости прокатки определяется следующими расчетами:

$$t_m = \frac{L_p}{V_2}; L_p = L'_p \cdot \mu, \quad (18)$$

где L'_p — длина раската в пропуске, предшествующем данному, м.

Время начальной паузы определяют по формуле

$$\tau_0 = \frac{l_p - L_{\text{рч}}}{V_p}, \quad (19)$$

где l_p — длина рольганга между черновой и чистовой клетями, м; $L_{\text{рч}}$ — длина раската после выхода из черновой клети, м.

Длительность подъема качающегося стола τ_c , число подъемов $Z_{\text{пс}}$, а также продолжительность пауз между пропусками рассчитывают по выражению

$$\tau_c = t_{1n} \cdot Z_{\text{пс}}, \quad (20)$$

где t_{1n} — длительность одного подъема; n — число пропусков.

Технически возможный такт прокатки в чистовой клети для рассматриваемого примера составляет $T_{\text{н2}}^{\text{тв}} = 64,93$ с (см. табл. 3).

Выводы

Обоснована методика технически возможной и нормативной производительности прокатных цехов на примере листопрокатного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Приведены модели расчета технически возможных тактов работы черновой двухвалковой и чистовой трехвалковой клетей. Показаны расчеты на примере прокатки слябов для получения листов размером 6000×1500×5 мм из стали марки 10ХСНД.

Результаты предложенных рациональных режимов обжатий в клетях внедрены в листопрокатном цехе для заданного сортамента цеха. Далее будут представлены модели работы вспомогательного оборудования этого цеха с целью обоснования технически возможной и нормативной производительности цеха, а также для анализа эффективности его работы.

Библиографический список

1. Железняк Л. М., Савиных В. В. Применение прокатно-волочильного стана в производстве изделий для электромашиностроения // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 8. С. 366–369.
2. Sáez P., Herrera C., Pezoa J. E. A product-driven system approach to generate fast solutions to the job shop scheduling problem // IFAC-Papers On Line. 2022. Vol. 55, Iss. 10. P. 1930–1937.
3. Медиков В. Я. Производственные мощности и их использование. — М.: МГУП, 2002. — 246 с.
4. Kowalski M., Steinboeck A., Kugi A. Optimal start times for a flow shop with blocking constraints, no-wait constraints, and stochastic processing times // IFAC-Papers On Line. 2021. Vol. 54, Iss. 1. P. 659–664. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.176.
5. Гасияров В. Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистового прокатного стана // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2019. Т. 19. № 2. С. 5–18. DOI: 10.14529/engin190201.
6. Тащненко В. П., Шатко Д. Б., Баканов А. А. Оптимизация технологического процесса на основе хронометража его ключевых операций //

- Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 12–19. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-12-19.
7. Попов Н. А. Оптимизация производственных процессов в условиях цифровизации // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2019. Т. 10. № 1. С. 28–35. DOI: 10.17747/2618-947X-2019-1-28-35.
 8. Edwin R., Kanya J. N., Geetha S. Analysis on productivity improvement, using lean manufacturing concept // Materials Today: Proceedings. 24 March 2021. Vol. 45, Part 7. P. 7176–7182. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.412.
 9. Петижев А. Д. Влияние технологического прогресса на стратегическую устойчивость металлургических предприятий // Московский экономический журнал. 2020. № 7. С. 532–540. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10522.
 10. 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.
 11. Румянцев М. И., Завалишин А. Н. Технологии производства листового проката и некоторые аспекты методологии их проектирования // Калибровочное бюро. 2019. Вып. 15. С. 13–23.
 12. Hongyan Chu, Ke Dong, Rui Li, Qiang Cheng et al. Integrated modeling and optimization of production planning and scheduling in hybrid flow shop for order production mode // Computers & Industrial Engineering. 2022. Vol. 174. 108741. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108741.
 13. 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.
 14. 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.

"Chernye metalli", 2024, No. 1, pp. 9–16
DOI: 10.17580/chm.2024.01.02

Feasibility demonstration of normative models for sheet-rolling shop productivity. Message 1

Information about authors

A. R. Fastyskovsky, Dr. Eng., Associate Prof., Head of the Dept. of Metal Forming and Metal Science¹, e-mail: fastyskovsky@mail.ru;

N. V. Martyshev, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Materials Science², e-mail: martyshev@tpu.ru;

A. I. Musatova, Lecturer, Institute of Additional Education¹, e-mail: musatova-ai@yandex.ru;

I. A. Savchenko, Dr. Soc., Associate Prof., Prof.³, e-mail: Savchenko-514@mgpu.ru;

A. I. Karlina, Cand. Eng., Researcher⁴, e-mail: karlinat@mail.ru

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

³ Moscow City University, Moscow, Russia.

⁴ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

Abstract: To solve a number of production, economic, organizational, logistics and operational management tasks, an information normative base of indicators is needed that is adequate for use in various periods of operation of existing rolling shops. Such periods include planning and actual operation of the workshop, reconstruction, modernization and improvement of new technologies. All these periods should be accompanied by an analysis and rapid restructuring of the information and regulatory framework, in which the primary task is to justify the productivity of the shop. At the same time, in many cases there is an insufficiently substantiated methodology for determining the productivity standards of rolling shops for a given assortment, which leads to inefficient use of equipment due to unforeseen downtime of metal at different stages of processing, increases cycle times, and reduces the productivity of rolling shops. The paper shows the significant role of productivity as an indicator of the efficiency of rolling shops and the relationship with technical and economic indicators. The main drawback of the applied calculation of the productivity of rolling shops with a sequential structure of sections is indicated, in each of which partial productivity is determined, and then the smallest value is selected from them. At the same time, difficulties arise in obtaining reliable data on metal consumption coefficients for sections. In this regard, the proposed model for substantiating the productivity of the workshop has a number of advantages: it corresponds to the clock approach and the possibility of using the total consumption coefficient of the metal from the available accounting information. The comprehensive research and analysis of the data obtained in the sheet-rolling shop made it possible to form an algorithm for the standard productivity of the shop based on a clock approach. Models of rational modes of reductions, rolling processes, technically possible cycles of work of roughing and finishing stands for a given assortment are given. Examples of the obtained values, based on the required dimensions of the finished sheets and the selected sections of the slabs, are shown fragmentarily in the tables.

Key words: productivity, cycles, sheet-rolling shop, roughing and finishing stands, rational reduction modes, models, algorithms.

References

1. Zheleznyak L. M., Savinykh V. V. Application of a rolling-drawing mill in the production of articles for electrical engineering. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*. 2018. Vol. 16. No. 8. pp. 366–369.
2. Sáez P., Herrera C., Pezoa J. E. A product-driven system approach to generate fast solutions to the job shop scheduling problem. *IFAC-Papers On Line*. 2022. Vol. 55, Iss. 10. pp. 1930–1937.
3. Medikov V. Ya. Production capacities and their use. Moscow: MGUP, 2002. 246 p.
4. Kowalski M., Steinboeck A., Kugi A. Optimal start times for a flow shop with blocking constraints, no-wait constraints, and stochastic processing times. *IFAC-Papers On Line*. 2021. Vol. 54, Iss. 1. pp. 659–664. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.176.
5. Gasiyarov V. R. Method for limiting dynamic loads of mechatronic systems of a plate rolling mill stand. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Mashinostroenie"*. 2019. Vol. 19. No. 2. pp. 5–18. DOI: 10.14529/engin190201.
6. Tatsienko V. P., Shatko D. B., Bakanov A. A. Optimization of the technological process based on the timing of its key operations. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. No. 1. pp. 12–19. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-12-19.
7. Popov N. A. Optimization of production processes in the context of digitalization. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*. 2019. Vol. 10. No. 1. pp. 28–35. DOI: 10.17747/2618-947X-2019-1-28-35.
8. Edwin R., Kanya J. N., Geetha S. Analysis on productivity improvement, using lean manufacturing concept. *Materials Today: Proceedings*. 2021. March 24. Vol. 45. pp. 7176–7182. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.412.
9. Petizhev A. D. The influence of technological progress on the strategic sustainability of metallurgical enterprises. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2020. No. 7. pp. 532–540. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10522.
10. Gizatulin R. A., Musatova A. I., Martyshev 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.
11. Rumyantsev M. I., Zavalishchin A. N. Technologies for production of sheet metal and some aspects of the methodology for their design. *Kalibrovchnoe byuro*. 2019. Iss. 15. pp. 13–23.
12. Hongyan Chu, Ke Dong, Rui Li, Qiang Cheng et al. Integrated modeling and optimization of production planning and scheduling in hybrid flow shop for order production mode. *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Vol. 174. 108741. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108741.
13. Kulakov S. M., Musatova A. I., Martyshev N. V., Karlina A. I. Situational optimization of the work of the thermal department, taking into account the ordering instability. *Chernye Metally*. 2022. No. 7. pp. 58–63.
14. Fastyskovsky A. R., Musatova A. I., Kulakov S. M., Martyshev N. V., Karlina A. I. Development of situational models for duration of production cycles of manufacturing finished rolled products. Message 1. *Chernye Metally*. 2023. No. 1. pp. 44–51.