

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1094)

02.2023

Тема номера:

Прокатка и другие процессы ОМД (стр. 17-48)

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 2 (1094), февраль 2023 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. Колокольников
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,
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. Е. Пелевин,
Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, Е. Ю. Сидорова,
И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, П. Шеллер (Германия),
Е. А. Яценко

Редакция:

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

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» № 2 (1094), февраль 2023 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 «Кандлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 09.03.2023. 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

ISSN 0132-0890



Подписной индекс:
12985 («Пресса России»)

9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- А. А. Жумаев, Ю. Н. Мансуров, В. Ю. Куликов, Х. И. Ахмедов. Легирование чугунов марок ИЧ280Х29НЛ и ИЧ330Х17Л с целью повышения их качества 4

Производство стали

- В. Е. Роцин, А. Д. Дрозин, П. А. Гамов, К. И. Смирнов. Декарбонизация сталеплавильного производства с позиций электронной теории восстановления металлов 10

Прокатка и другие процессы ОМД

- В. В. Бринза. Наукометрия актуальных направлений повышения эффективности процесса прокатки высоких полос из специальных сталей, склонных к внутреннему дефектообразованию . . . 17
- Д. Ю. Ермушин, Н. Л. Болобанова. Исследование поверхностного деформационного упрочнения бочки опорных валков чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки. . . 27
- П. П. Полецков, Д. Ю. Алексеев, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалеева. Моделирование процесса охлаждения при закалке листовой стали в условиях толстолистового стана 5000 33
- А. Р. Фастыковский, А. И. Мусатова, С. М. Кулаков, Н. В. Мартюшев, А. И. Карлина. Разработка ситуационных моделей длительности производственных циклов изготовления партий готового проката. Сообщение 2 38
- Е. А. Галактионова, Ле Чунг Зунг, Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев. Зависимость величины твердости от интенсивности напряжений и деформации при холодной объемной штамповке . . . 45

Металловедение и металлография

- М. В. Кириличев, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, Д. С. Толстых. Исследование особенностей распределения и микроликвации легирующих элементов в слитках конструкционных низколегированных сталей 49
- Е. И. Пряхин, А. В. Михайлов, А. В. Сивенков. Технологические особенности поверхностного легирования металлических изделий Cr-Ni-комплексами в среде расплавов легкоплавких металлов 58
- С. В. Давыдов. Диаграмма Fe – 100 % C. Часть 1. Базовые противоречия диаграммы Fe – Fe₃C. 66

Литейное производство

- Н. А. Кидалов, Н. В. Белова, А. А. Белов, А. С. Адамова. Разупрочнение песчаных смесей на жидкостекольном связующем за счет термоокислительной деструкции комбинированной углеродсодержащей добавки. Часть 2 74
- Николаю Алексеевичу Кидалову — 70 лет 81

Машиностроительные технологии

- М. А. Адмакин, А. Д. Халимоненко, В. П. Захарова, Нгуен Ван Дао. Обрабатываемость резанием маломангнитных высокомарганцовистых сталей 82
- Юрию Леонидовичу Бобарикину — 60 лет 88

Журнал "Черные металлы"

по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в
"Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук"

(<https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=3408291001&f=15951>)

Разработка ситуационных моделей длительности производственных циклов изготовления партий готового проката. Сообщение 2

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

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

С. М. Кулаков, профессор кафедры автоматизации и информационных систем¹, докт. техн. наук,
эл. почта: kulakov-ais@mail.ru

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

А. И. Карлина, научный сотрудник³, канд. техн. наук, эл. почта: karlinat@mail.ru

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

²Томский политехнический университет, Томск, Россия.

³Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

Для рационального планирования и прогнозирования сроков производства необходим четкий учет и нормирование продолжительности циклов выпуска продукции. Длительность изготовления партий продукции лежит в основе построения оперативных планов-графиков. Без продолжительности циклов невозможно установить календарные сроки запуска полуфабрикатов на определенную стадию обработки, а также определить сроки выпуска продукции, сроки прохождения партии продукции по отдельным производственным участкам. Рассматриваемая задача многовариантного оценивания длительности изготовления конкретной партии прокатной продукции в среднесортном цехе состоит в обосновании для каждой производственной ситуации оптимальной длительности операций, требуемых для выпуска данной партии. Для решения этой задачи необходимо: построить модели производственных процессов, выполняемых в каждом отделении среднесортного цеха; определить состав, продолжительность и условия выполнения технологических, естественных, трудовых, контрольных и транспортных операций; указать типы и число применяемого оборудования в каждом отделении; перечислить виды единиц материального потока (заготовка, пачка, пакет); установить характер и вид движения полуфабрикатов (изделий) по операциям каждого процесса; задать способы перемещения изделий от каждой предыдущей операции на каждую последующую (штучный, пакетный, партионный), а также число перемещаемых пакетов и партий; учесть вид применяемых поточных линий (непрерывная, полунепрерывная, дискретная). Все перечисленное отражено в представленном укрупненном алгоритме, апробация которого выполнена методом моделирования с использованием натурных данных действующего предприятия.

Ключевые слова: длительность изготовления партий продукции, такты работы оборудования, ситуационные модели, длительность производственных операций, главные и локальные контуры алгоритма, подсистемы, система.
DOI: 10.17580/chm.2023.02.06

Введение

Процедура построения ситуационных моделей длительности производственных циклов при изготовлении партий прокатной продукции в среднесортном цехе, состоящем из склада заготовок, технологической линии и склада готовой продукции предложена в работе [1]. Обоснован выбор ведущего подразделения — технологической линии, где выполняются основные производственные процессы на участках, жестко связанных между собой единым материальным потоком, от непрерывности которого во многом зависит эффективность функционирования всей системы (цеха).

В условиях насыщенности современного прокатного производства различными установками и механизмами возникает необходимость тщательного координирования их действий, строгой увязки во времени работы всех производственных участков и отделений, создания непрерывной

поточной системы организации производства [2–5]. Принцип непрерывности нашел свое выражение в работе прокатных станов с последовательным расположением клетей и включением в общий материальный поток вспомогательного оборудования, действующего синхронно с прокатным станом.

Анализ поступающих заказов по некоторым металлургическим предприятиям показал, что спрос на прокатную продукцию характеризуется изменчивостью. В результате возникает необходимость предварительно оценивать длительность выполнения заказов с учетом различных объемов выпуска готовой товарной продукции [6–9]. Решение о целесообразности и сроках рационального выполнения заказов предложено принимать на основе разработанного авторами алгоритма, включающего ситуационные модели длительности производственных циклов изготовления партий готового проката.

Составляющие комплекса интегрированных моделей

Предлагаемой процедуре многовариантного моделирования производственных процессов для оценивания длительности изготовления партий прокатной продукции в среднесортном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» предшествовали следующие операции: подготовка исходной информации на основе изучения проектной технической и отчетной документации цеха, проведение в течение нескольких месяцев визуальных, хронометражных и мониторинговых наблюдений за организацией материальных потоков, работой основного и вспомогательного оборудования, действиями операторов постов управления.

Разработанный комплекс интегрированных моделей включает следующие компоненты [10–12]:

- табличные модели производственных операций и их элементов для каждого отделения, участка, включающие наименование операций (элементов); пространственные координаты фиксажных точек, соответствующих моментам начала и окончания операций (элементов); наименование используемого оборудования; виды операций (машинные, ручные, машинно-ручные); классы операций (технологические, транспортные, естественные, контрольные); единицы обрабатываемых изделий (заготовка, пачка заготовок, пачка штанг, пакет проката);
- графические модели процессов, отображающие последовательность производственных операций, декомпозицию их на элементы и микроэлементы для каждого подразделения [13–15];
- формульные модели длительности операций, построенные на основе комплексирования различных методов исследования (декомпозиция операций на элементы, обработка полученных наблюдений, идентификация формульных моделей) с учетом сортамента (профилеразмеров) прокатной продукции, технических и технологических параметров работы оборудования;
- модели ситуационных тактов работы оборудования в подразделениях;
- ситуационные модели длительности производственных процессов;
- многовариантные модели длительности изготовления партии готовой продукции для каждого технологического маршрута (с учетом перечисленных выше факторов и производственных ситуаций).

Для определения длительности изготовления каждой конкретной партии продукции по заказам потребителей были заданы следующие параметры: технология производства сортового проката; состав, продолжительность и условия выполнения технологических, естественных, трудовых, контрольных и транспортных операций; тип и число применяемого оборудования; вид единицы материального потока; характер и принцип движения полуфабрикатов (изделий) по операциям процесса; способ их перемещения с каждой предыдущей операции процесса на каждую последующую (штучный, пакетный, партионный); число выходных пакетов и партий; вид поточной линии (непрерывная, полунепрерывная, дискретная).

Алгоритм оценивания длительности производственного цикла

Пошаговая процедура оценки ситуационной длительности производственных циклов изготовления партии готового проката каждого профилеразмера представлена в виде укрупненного алгоритма, включающего комплекс формульных моделей работы подсистем (склада заготовок, технологической линии, склада готовой продукции) и системы в целом (среднесортного цеха) (**рисунок**).

Общая структура алгоритма включает главный контур, действия которого циклически повторяются для каждого профилеразмера проката. Контур состоит из двух разделов: первый содержит модули оценивания длительности технологических, транспортных и контрольных операций, тактов работы подсистем, штучной длительности производственного цикла каждой подсистемы и системы в целом, а второй включает сложные локальные контуры, связанные с оцениванием ситуационных тактов работы подсистем и системы в целом, с определением ситуационной длительности функционирования каждой подсистемы и выбором из них максимальной длительности производственного цикла.

В первом разделе главного контура алгоритма происходит оценка длительности следующих операций технологической линии (главной подсистемы): нагрева заготовки в методической печи с шагающими балками с учетом температурного режима поступающего металла (блоки 8, 9); прокатки заготовки в клетях непрерывного стана (блок 12); охлаждения раската на секции холодильника реечного типа (блок 16) с учетом шага реек (блок 17); правки штанг в сортоправильной машине (блок 23), кроме профилей круглого и квадратного сечения; порезки пачки штанг на ножницах холодной резки (блок 28) с предварительной оптимизацией раскрытия штанг на мерные товарные длины проката (блок 27); пакетировки готового проката на автоматизированном агрегате для фасонных профилей (блок 35) или накопления и обвязки пакета в специализированном кармане для круглого и арматурного проката (блоки 38, 39).

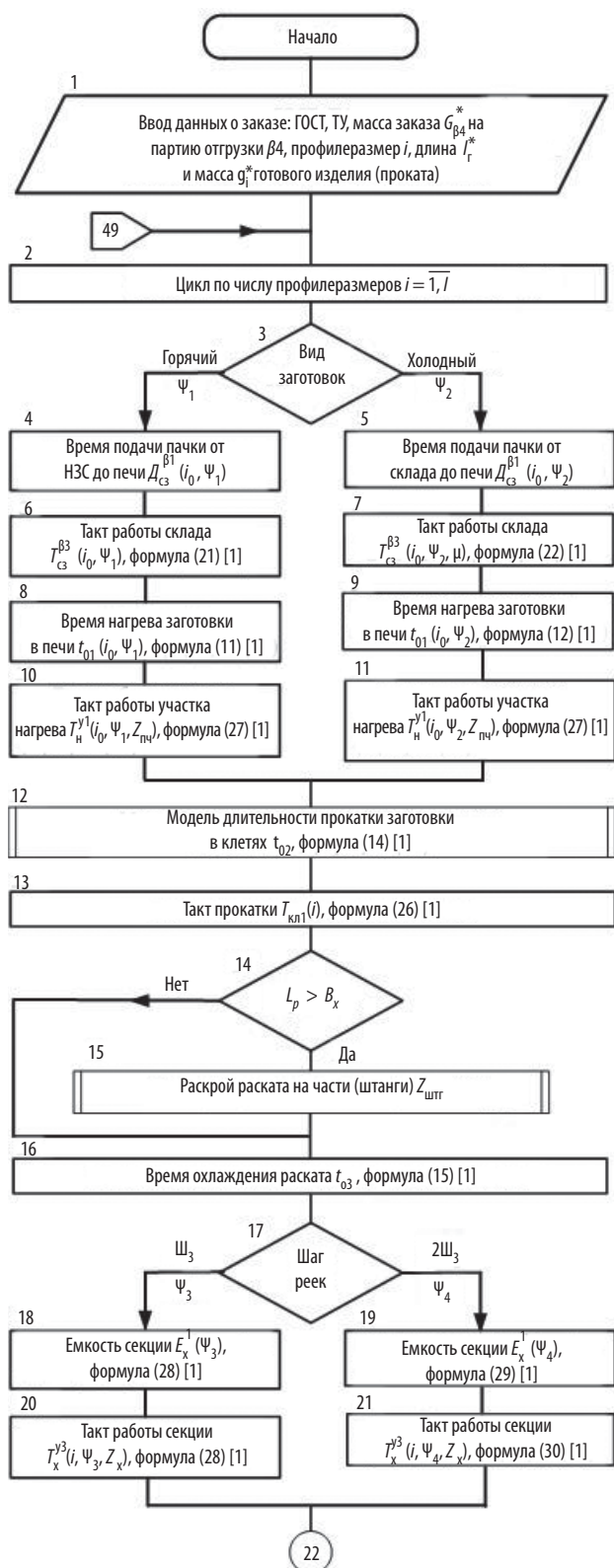
Для определения длительности штучного производственного цикла технологической линии $D_{\text{тл}}^{\beta_3}(i, \psi_{1-4})$ (блок 41), кроме длительности перечисленных операций, учитывают длительности транспортных и контрольных операций, которые отражены в блоках 26, 30, 33, 34, 37. Длительности штучных производственных циклов склада заготовок $D_{\text{сз}}^{\beta_1}(i_0, \psi_{1,2})$ по маршрутам подачи горячих или холодных заготовок и склада готового проката $D_{\text{кр1}}^{\beta_3}$ представлены в блоках 4, 5, 42 соответственно.

Длительность штучного производственного цикла системы (цеха), состоящей из трех подсистем (двух складов и технологической линии), приведена в блоке 43.

$$D_{\text{ц}}^{\text{шт}} = D_{\text{сз}}^{\beta_1}(i_0, \psi_{1,2}) + D_{\text{тл}}^{\beta_3}(i_0, \psi_{1,4}) + D_{\text{кр1}}^{\beta_3}(i),$$

где β_1 и β_3 — пачка заготовок и пакет готового проката соответственно; i_0 и i — профилеразмер заготовки и готового проката соответственно; ψ_1 и ψ_2 — температурный режим заготовок (горячий и холодный соответственно); ψ_3 и ψ_4 — способы укладки штанг на холодильник (на каждую зубчатую рейку или через рейку соответственно).

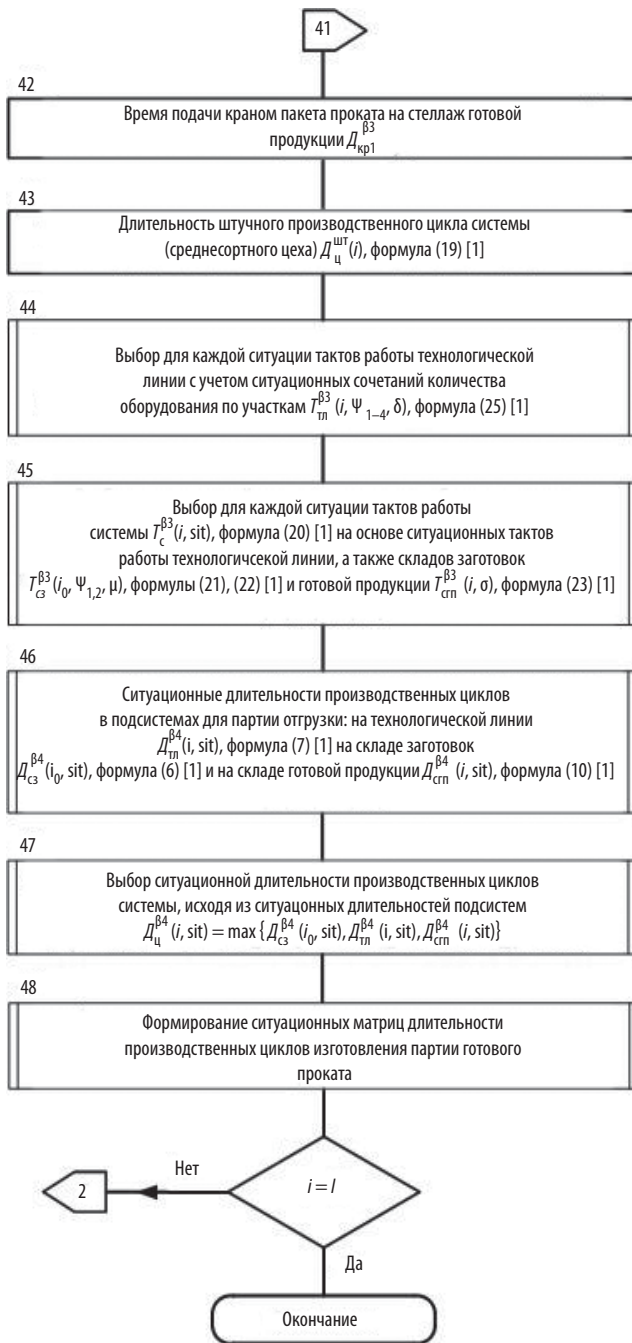
Модули расчета тактов работы подсистем на пакет готового проката встроены в первую часть алгоритма в соответствии с ходом производственного процесса (блоки 6, 7, 10, 11, 13, 20, 21, 24, 29, 36, 40). Такты применяют в последующих локальных контурах при оценке ситуационной длительности производственных циклов подсистем.



Во втором разделе главного контура представлены пять сложных локальных контуров (модулей). Первый локальный контур (блок 44) осуществляет следующие действия: формирование множества возможных ситуаций, отличающихся числом и вариантами режимов работы используемого оборудования на участках технологической линии, представленных



Окончание рисунка



Укрупненный алгоритм оценивания ситуационной длительности изготовления партии сортового проката

в табл. 1 [1]; вычисление ситуационных тактов работы участков; определение единого такта работы линии путем выбора максимального из тактов участков для каждой ситуации.

Второй локальный контур (блок 45) выполняет перебор ситуаций на складах (подсистемах) цеха по числу кранового оборудования и рассчитывает ситуационные такты работы этих подсистем. Затем проводится сравнительный анализ тактов совместной работы трех подсистем (относительно главной из них — технологической линии). Выбор единого такта работы $T_{\text{с}}^{\text{B3}}(i, \text{sit})$ системы для партии проката

осуществляется для каждой ситуации (sit) на основе тактов работы подсистем по следующим условиям:

$$T_{\text{с}}^{\text{B3}}(i, \text{sit}) = \begin{cases} T_{\text{тл}}^{\text{B3}}(i), & \text{если } T_{\text{с3}}^{\text{B3}}(i_0) \leq T_{\text{тл}}^{\text{B3}}(i_0) \geq T_{\text{сгп}}^{\text{B3}}(i); \\ T_{\text{с3}}^{\text{B3}}(i), & \text{если } T_{\text{с3}}^{\text{B3}}(i_0) > T_{\text{тл}}^{\text{B3}}(i_0) \geq T_{\text{сгп}}^{\text{B3}}(i); \\ T_{\text{сгп}}^{\text{B3}}(i), & \text{если } T_{\text{с3}}^{\text{B3}}(i_0) \leq T_{\text{тл}}^{\text{B3}}(i_0) < T_{\text{сгп}}^{\text{B3}}(i); \end{cases} \quad (1)$$

где $T_{\text{тл}}^{\text{B3}}(i)$, $T_{\text{с3}}^{\text{B3}}(i_0)$, $T_{\text{сгп}}^{\text{B3}}(i)$ — такты работы подсистем (технологической линии, склада заготовок и склада готовой продукции соответственно).

Третий локальный контур (блок 46) реализует процедуру оценки длительности ситуационных производственных циклов для партии отгрузки готового проката $D_{\text{тл}}^{\text{B4}}(i, \text{sit})$, $D_{\text{с3}}^{\text{B4}}(i_0, \text{sit})$ и $D_{\text{сгп}}^{\text{B4}}(i, \text{sit})$ по каждой подсистеме.

Четвертый завершающий локальный контур оценки ситуационной длительности производственного цикла изготовления партии готового проката (блок 47) осуществляет финальный выбор максимального значения длительности цикла из трех подсистем по каждой возможной ситуации.

Итоговый контур (блок 48) предусматривает создание интерфейсных матриц, включающих временные показатели (длительности технологических, транспортных, естественных, трудовых и контрольных операций; штучных, партионных тактов работы участков и подсистем), характеризующие длительность производственного цикла изготовления партии готового проката i -го профиля для каждой ситуации.

Нормативные модели функционирования среднесортного цеха

Предлагаемая методика предусматривает два основных режима функционирования прокатного цеха: установившийся режим, при котором возникают технологически необходимые паузы, а также мелкие эпизодические задержки материального потока, так называемые скрытые простои (<3 мин) в работе основного и вспомогательного оборудования; неустойчивый режим, когда простаивает ведущий участок (прокатный стан) и полностью (или частично) все смежные участки системы. В этом случае, кроме скрытых, появляются текущие простои (>3 мин), при которых производственный цикл нарушается и происходит остановка прокатного стана.

Представленная в работе [1] методика определения длительности производственного цикла изготовления партии готового проката и соответствующий алгоритм относятся к оценке технически возможных показателей штучной $D_{\text{ц}}^{\text{шт}}$ и партионной длительности производственных циклов $D_{\text{ц}}^{\text{B4}}(\text{sit})$ по сортаменту и ситуациям. При построении нормативных моделей необходимо нормировать скрытые простои, возникающие в процессе производства, которые принято интегрально отображать в виде нормативных коэффициентов использования оборудования, зависящих от степени механизации и автоматизации оборудования, вспомогательных механизмов и приспособлений, а также от уровня квалификации обслуживающего персонала на основе проведенных комплексных исследований фактических простоев [16, 17].

В период исследований определяли фактические значения скрытых простоев (пауз, мелких задержек) в работе обо-

Таблица 1

Обоснование ситуационных тактов работы технологической линии

Профили, размеры	Участки технологической линии						Такт работы линии
	нагрева	прокатки	охлаждения	правки	порезки	пакетировки	
	Число используемого оборудования Z						
Шахтная стойка (СВП17) sit № 5 Сечение заготовки 150×150 мм $l_3 = 8$ м $l_r^* = 10$ м	$Z_{пч} = 2, \psi_2$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 2, \psi_4$	$Z_{пр} = 1$	$Z_{нж} = 1$	$Z_{па} = 2$	–
	Технически возможные такты, с						
	15,2	16,6	27,6	25,7	14,2	17,5	27,6
	Нормативные коэффициенты использования оборудования						
	0,91	0,90	0,89	0,87	0,85	0,88	0,89
	Нормативные такты, с						
	16,7	18,4	31,0	29,5	16,7	19,9	31,0
Швеллер № 16 sit № 11 150×200 мм $l_3 = 12$ м $l_r^* = 9$ м	$Z_{пч} = 3, \psi_2$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 2, \psi_4$	$Z_{пр} = 2$	$Z_{нж} = 2$	$Z_{па} = 2$	–
	Технически возможные такты, с						
	30,6	26,1	21,1	14,2	21,0	18,3	30,6
	Нормативные такты, с						
		33,6	29,0	23,7	16,3	24,7	20,8
Угловой прокат 80×80×7 мм sit № 24 150×150 мм $l_3 = 10,8$ м $l_r^* = 11,7$ м	$Z_{пч} = 2, \psi_1$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 2, \psi_3$	$Z_{пр} = 2$	$Z_{нж} = 2$	$Z_{па} = 2$	–
	Технически возможные такты, с						
	15,1	23,2	20,3	14,7	11,8	13,7	23,2
	Нормативные такты, с						
		16,6	25,8	22,8	16,9	13,9	15,6

Таблица 2

Результаты моделирования длительности изготовления партии проката

Профиль, размер	Длительность производственного цикла среднесортного цеха							
	$D_{ц}^{шт}, ч$		$D_{ц}^{\beta 4}(sit), ч$		$\overline{D}_{ц}^{\beta 4}(sit), ч$		$\overline{\overline{D}}_{ц}^{\beta 4}(sit), ч$	
	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2
Круг диаметром 32 мм	1,88	2,47	2,11	2,78	2,42	3,19	2,78	3,67
Арматура № 40	2,07	2,63	2,33	2,96	2,68	3,40	3,08	3,91
Балка № 16	1,80	2,54	2,02	2,85	2,32	3,28	2,67	3,77

Примечание. $D_{ц}^{шт}$ и $D_{ц}^{\beta 4}(sit)$ — технически возможная штучная длительность на пакет проката $\beta 3$ и ситуационная на партию отгрузки $\beta 4$ соответственно; $\overline{D}_{ц}^{\beta 4}(sit)$ и $\overline{\overline{D}}_{ц}^{\beta 4}(sit)$ — нормативная ситуационная длительность с учетом нормативных скрытых и текущих простоев соответственно.

рудования и в продвижении материального потока (т. е. паузы между обработками двух смежных заготовок, раскатов, пачек, пакетов). При этом фиксировали длительности и причины возникновения скрытых простоев методами хронометражных наблюдений, мониторингового слежения, экспертных оценок и математико-статистической обработки данных. В результате определяли средние значения фактических скрытых простоев, затем их анализировали и разделяли по группам причин (техническим, технологическим, организационным), при этом каждую из них декомпозировали на зависящие и независимые от работы данного участка.

После разработки нормативных значений скрытых простоев и коэффициентов использования оборудования для каждого участка создавали нормативные временные модели функционирования среднесортного цеха. Далее в качестве примера приведены две модели работы технологической линии.

Нормативная модель длительности штучного производственного цикла технологической линии

$$\overline{D}_{ц}^{\beta 3}(i, \psi_{1-4}) = \frac{t_{o1}(i, \psi_{1,2})}{k_{и}^{o1}} + \dots + \frac{t_{o6}(i)}{k_{и}^{o6}} + \frac{\sum t_{тр}}{k_{и}^{тр}} + \frac{\sum t_{к}}{k_{и}^{к}}, \quad (2)$$

где $t_{o1}, \dots, t_{o6}, t_{тр}, t_{к}$ — технически возможные длительности: технологических операций нагрева, прокатки, охлаждения, правки, порезки, пакетировки, транспортных и контрольных операций соответственно; $k_{и}^{o1}, \dots, k_{и}^{o6}, k_{и}^{тр}, k_{и}^{к}$ — нормативные коэффициенты использования оборудования, соответствующие вышеперечисленным операциям.

Нормативная модель ситуационного такта работы технологической линии $\overline{T}_{ц}^{\beta 3}$, которая формируется на основе нормативных тактовых моделей работы участков $\overline{T}_{ц}^{\beta 3}$:

$$\overline{T}_{ц}^{\beta 3}(i, \psi_{1-4}, \delta) = \max \left\{ \overline{T}_{ц}^{y1} = \frac{T_{ц}^{y1}}{k_{и}^{o1}}; \dots; \overline{T}_{ц}^{y6} = \frac{T_{ц}^{y6}}{k_{и}^{o6}} \right\}, \quad (3)$$

где $T_{тл}^{y1}, \dots, T_{тл}^{y6}$ — технически возможные ситуационные такты работы участков (см. формулу (25) в работе [1]).

Полученные посредством моделирования значения технически возможных и нормативных тактов работы участков, а также выбранные единые такты работы главной подсистемы цеха (технологической линии) фрагментарно приведены в табл. 1 по некоторым ситуациям (*sit*) и профилеразмерам.

Например, для профилеразмера «шахтная стойка» (СВП17) в ситуации (*sit* № 5) нормативный такт работы линии, формула (3), составляет:

$$\bar{T}_{тл}^{\beta 3}(i, \psi_2, \psi_4, \delta) = \max\{28,5; 18,4; \mathbf{30,7}; 28,9; 18,2; 20,8\} = \mathbf{30,7} \text{ с.}$$

В данной ситуации «узким» местом является вспомогательный участок охлаждения, т. е. такт работы линии соответствует такту участка охлаждения, который лимитирует работу ведущего участка прокатки.

В ситуации (*sit* № 11) для профилеразмера «швеллер № 16» «узким» местом является участок нагрева. Для углового профиля (*sit* № 24) «узкое» место отсутствует, т. е. такт работы технологической линии соответствует такту работы участка прокатки, что является рациональным вариантом подбора используемого оборудования на вспомогательных участках.

Таким образом сформированная для всего сортамента прокатной продукции матрица технически возможных и нормативных тактов работы участков технологической линии, учитывающая расчетные длины и сечения заготовок, заданные длины готового проката (по заказам), технологические режимы и производственные ситуации, позволяет определить рациональный вариант функционирования линии.

С целью установления ситуационных тактов работы производственной системы (среднесортного цеха) (формула (20) работы [1]) по отношению к тактам работы технологической линии осуществляют перебор числа используемых кранов на складах для своевременной подачи холодных заготовок к нагревательным печам и укладки пакетов готового проката на стеллажи.

Следует отметить, что при выполнении заказа с длительностью изготовления партии проката более 2 ч, кроме нормативных коэффициентов использования скрытых простоев (k_{μ}^H), необходимо учитывать средний нормативный коэффициент использования текущих простоев $k_{тпр}^H$ по формуле

$$\bar{D}_{ц}^{\beta 4}(i, sit) = \bar{D}_{ц}^{\beta 4}(i, sit) \cdot k_{тпр}^H, k_{тпр}^H = 1,15.$$

Проведенный анализ ежемесячно поступивших заказов в течение года в среднесортном цехе выявил увеличение спроса на прокатную продукцию как крупными, так и малыми партиями отгрузки различного сортамента. В связи с этим возникла необходимость оценки рациональности выполнения заказов по основным профилеразмерам с учетом масштабыности изготовления партий отгрузки в железнодорожных вагонах массой 65 или 68 т и автотранспортом для малотоннажных перевозок.

Примеры результатов моделирования компонентов длительности производственного цикла в среднесортном цехе для партий отгрузки (вагонная норма массой $G_{\beta 4}^* = 65$ т) представлены в табл. 2 для нескольких профилеразмеров и ситуаций.

Сравнительная оценка ситуационной нормативной длительности изготовления каждой партии готовой прокатной продукции по сортаменту показала возможность выбора наиболее предпочтительных вариантов выполнения заказов.

Предлагаемые разработки представлены руководству среднесортного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и апробированы при планировании и реализации по нескольким профилеразмерам. В результате отмечены сокращение фактической длительности изготовления заказов на 15–18 %, высвобождение оборотных средств, находящихся в производственном процессе, и увеличение скорости их оборота.

Выводы

Проведенное исследование является продолжением работы по постановке и решению комплексной задачи определения длительности выполнения заказов на изготовление партий готового проката. В данном сообщении описан укрупненный алгоритм расчета длительности, который включает главный и пять локальных контуров моделирования работы производственного комплекса. В контурах использованы многофакторные модели длительности производственных процессов, реализуемых на складе заготовок, технологической линии и складе готового проката. Ситуационное оценивание нормативной длительности производственных циклов на основе разработанного алгоритма позволяет руководству цеха решать задачу выбора рациональных ситуаций и режимов работы оборудования при планировании, прогнозировании и оперативном управлении для эффективной реализации заказов «точно в срок».

Разработанная нормативная база показателей функционирования среднесортного цеха рекомендована для планирования и прогнозирования сроков выполнения заказов на партии прокатной продукции с учетом возможных производственных ситуаций, различающихся числом используемого оборудования и вариантами технологических режимов на участках цеха.



Библиографический список

1. 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.
2. Аркин П. А., Муханова Н. В. Решение задачи выбора типа оборудования для быстрого прототипирования // Организатор производства. 2020. Т. 28. № 2. С. 108–117. DOI: 10.25987/VSTU.2020.89.98.010.
3. Митрофанов А. Ю. Моделирование стохастических производственных систем иерархической структурой // Математические методы в технологиях и технических системах. 2021. № 2. С. 84–88. DOI: 10.52348/2712-8873MMTT.
4. Lenort R., Feliks J. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies // Metal. 2013. No. 5. P. 15–17.
5. Schönmeyer M., Schmidt Ch., Herrmann Ch., Thiede S. Multi-level modeling and simulation of manufacturing systems for lightweight automotive components // Procedia CIRP. 2016. Vol. 41. P. 1049–1054. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.063.
6. Malindžák D., Gazda A., Malindžáková M., Vitko D. The basic principles and rules for heuristic model creation in metallurgy // Metalurgija. 2013. Vol. 52, Iss. 4. P. 549–552.
7. Большова Н. В., Жуковская И. В., Щелканов С. К., Галаев А. С. Концепция внедрения системы цехового планирования и учета в АО «КРАСМАШ» // Решетневские чтения. 2015. С. 168, 169.

8. Rachad S., Fouraiji H., Bensassi B. Modeling a production system by parametric identification approach // 2014 2nd World Conference on Complex Systems (WCCS). 2015. P. 402–406. DOI: 10.1109/ICoCS.2014.7060882.
9. Kübler F., Böhner J., Steinhilper R. Resource efficiency optimization of manufacturing processes using evolutionary computation: A turning case // The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering. 2015. Vol. 29. P. 822–826.
10. Кулаков С. М., Мусатова А. И., Кадиков В. Н. Многовариантное оценивание длительности изготовления партий стальной проволоки на основе ситуационно-нормативных моделей. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. № 6. С. 484–491. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-484-491.
11. Rüttimann B. G. Modeling of Production Systems. In book: Lean Compendium. 2017. P. 7–20.
12. Муравьева Г. Ю. Комплексный подход к определению длительности производственного цикла в отраслях с нештучным учетом выпускаемой продукции // Научные ведомости. Серия «Экономика. Информатика». 2016. № 2 (223). Вып. 37. С. 38–41.
13. Сидоренко Ю. А., Фролов В. Г., Салмина Н. А. Основные характеристики и особенности логистических систем управления материальным потоком в сфере промышленного производства // Вестник Нижегородского университета. Серия «Социальные науки». 2016. № 2 (42). С. 63–72.
14. Long F., Zeiler P., Bertsche B. Modelling the flexibility of production systems in Industry 4.0 for analysing their productivity and availability with high-level Petri nets // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, Iss. 1. P. 5680–5687. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1118.
15. Li M., Li D. Process modeling for production system based on matrix mapping // Advanced Materials Research. 2010. Vols. 156–157. P. 1497–1500. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.1497.
16. Мусатова А. И., Кулаков С. М., Кадиков В. Н. К оцениванию нормативных коэффициентов использования оборудования в прокатных цехах // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 2. С. 47–51.
17. Жуковская И. В., Щелканов С. К., Балышова Н. В. Система оперативного управления производственной деятельностью цехов предприятий PKT // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. С. 452–453.

"Chernye metally", 2023, No. 2, pp. 38–44
DOI: 10.17580/chm.2023.02.06

Development of situation models for duration of production cycles of manufacturing finished rolled products. Message 2

Information about authors

A. R. Fastikovskiy, Dr. Eng., Associate Prof., Head of the EVRAZ ZSMK Dept. of Metal Processing and Metal Science¹, e-mail: fastikovskiy@mail.ru;

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

S. M. Kulakov, Dr. Eng., Prof., Dept. of Automation and Information Systems¹, e-mail: kulakov-ais@mail.ru;

N. V. Martyushev, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metal Science², e-mail: martjushev@tpu.ru;

A. I. Karlina, Cand. Eng., Researcher³, e-mail: karlinat@mail.ru

¹ Siberian State Industrial University (Russia, Novokuznetsk)

² Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

³ Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Abstract: For rational planning and forecasting of production time, a clear accounting and regulation of the duration of production cycles is necessary. The duration of manufacturing batches of products is the basis for the construction of operational schedules. Without the duration of cycles, it is impossible to set calendar dates for the launch of semi-finished products at a particular stage of processing, as well as to determine the timing of product release, the timing of the passage of a batch of products through individual production areas. The problem of multivariate estimation of the duration of manufacturing a specific batch of rolled products is solved, which consists in substantiating, for each production situation, the optimal duration of operations required for the release of this batch. Models of production processes carried out in the departments of a medium-sized shop are built, the composition, duration and conditions for performing technological, natural, labor, control and transport operations are determined; the types and quantity of equipment used in departments are indicated; lists the types of material flow units (blank, pack, package); the nature and type of movement of semi-finished products (products) in the operations of the production process are established; the ways of moving products from the previous operation to the next one (piece, batch, batch), as well as the number of packages and batches to be moved are specified; the types of production lines used (continuous, semi-continuous, discrete) are taken into account. All of the above is reflected in the presented enlarged algorithm, the approbation of which was carried out by modeling using field data of an operating enterprise.

Key words: duration of manufacturing batches of products, cycles of equipment operation, situational models, duration of production operations, main and local contours of the algorithm, subsystems, systems.

References

1. Fastikovskiy A. R., Musatova A. I., Kulakov S. M., Martyushev N. V., Karlina A. I. Development of situational models of the duration of production cycles for the production of batches of finished rolled products. Message 1. *Chernye Metally*. 2023. No. 1. pp. 44–51.

2. Arkin P. A., Mukhanova N. V. Solving the problem of choosing the type of equipment for rapid prototyping. *Organizator proizvodstva*. 2020. Vol. 28. No. 2. pp. 108–117. DOI: 10.25987/VSTU.2020.89.98.010.
3. Mitrofanov A. Yu. Modeling stochastic production systems with a hierarchical structure. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnicheskikh sistemakh*. 2021. No. 2. pp. 84–88. DOI: 10.52348/2712-8873MMTT.
4. Lenort R., Feliks J. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies. *Metal*. 2013. No. 5. pp. 15–17.
5. Schönmemann M., Schmidt Ch., Herrmann Ch., Thiede S. Multi-level Modeling and Simulation of Manufacturing Systems for Lightweight Automotive Components. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 41. pp. 1049–1054. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.063.
6. Malindžák D., Gazda A., Malindžáková M., Vitko D. The basic principles and rules for heuristic model creation in metallurgy. *Metallurgija*. 2013. Vol. 52. No. 4. pp. 549–552.
7. Bolshova N. V., Zhukovskaya I. V., Shchelkanov S. K., Galaev A. S. The concept of introducing a system of shop planning and accounting in JSC KRASMASH. *Reshetnikov's Readings*. 2015. pp. 168, 169.
8. Rachad S., Fouraiji H., Bensassi B. Modeling a production system by parametric identification approach. 2014 2nd World Conference on Complex Systems, WCCS 2014. 2015. pp. 402–406. DOI: 10.1109/ICoCS.2014.7060882.
9. Kübler F., Böhner J., Steinhilper R. Resource efficiency optimization of manufacturing processes using evolutionary computation: A turning case. *The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering*. 2015. Vol. 29. pp. 822–826.
10. Kulakov S. M., Musatova A. I., Kadykov V. N. Multivariate estimation of the duration of manufacture of steel wire batches based on situational normative models. Message 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2019. No. 6. pp. 484–491. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-484-491.
11. Rüttimann B. Modeling of Production Systems. In book: Lean Compendium. 2017. pp. 7–20.
12. Muravyeva G. Yu. An integrated approach to determining the duration of the production cycle in industries with non-piece accounting for manufactured products. *Nauchnye vedomosti. Seriya "Ekonomika, informatika"*. 2016. No. 2 (223). Iss. 37. pp. 38–41.
13. Sidorenko Yu. A., Frolov V. G., Salmina N. A. The main characteristics and features of logistics systems for managing material flow in the field of industrial production. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta. Seriya "Sotsialnye nauki"*. 2016. No. 2 (42). pp. 63–72.
14. Long F., Zeiler P., Bertsche B. Modelling the flexibility of production systems in Industry 4.0 for analysing their productivity and availability with high-level Petri nets. *IFAC-Papers OnLine*. 2017. Vol. 50, Iss. 1. pp. 5680–5687. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1118.
15. Li M., Li D. Process Modeling for Production System Based on Matrix Mapping. *Advanced Materials Research*. 2010. Vols. 156–157. pp. 1497–1500. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.1497.
16. Musatova A. I., Kulakov S. M., Kadykov V. N. On the evaluation of standard coefficients of equipment use in rolling shops. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2010. No. 2. pp. 47–51.
17. Zhukovskaya I. V., Shchelkanov S. K., Balyshova N. V. The system of operational management of the production activities of the shops of the rocket and space equipment enterprises. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2015. Vol. 1. pp. 452–453.