

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1093)

01.2023



*Тема номера:
40 лет кафедре «Машиностроение»
Набережночелнинского института
Казанского федерального университета (стр. 15-37).*

Черные металлы

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 1 (1093), январь 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. 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. Капусткина, 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» № 1 (1093), январь 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 «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 10.02.2023. Формат 60×90/8.
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

- Д. Р. Ганин, А. Ю. Фукс.* Взаимосвязь газодутьевых параметров доменных печей и основных качественных показателей кокса в условиях АО «Уральская сталь»

Прокатка и металловедение

- И. С. Васильев, П. Ю. Жихарев, А. В. Пересторонин, В. В. Мухин.* Разработка технологии производства новых материалов на традиционных широкополосных станах горячей прокатки с применением современных методов численного и физического моделирования. Часть 2

40 лет кафедре «Машиностроение» Набережночелнинского института Казанского федерального университета

- В. Г. Шibaков.* Кафедре «Машиностроение» Набережночелнинского института Казанского (Приволжского) федерального университета — 40 лет
- В. Г. Шibaков, Д. Л. Панкратов, А. М. Валиев, Р. В. Шibaков.* Штампуемость заготовок из горячекатаного толстолистного проката из микрелегированной стали с высоким пределом текучести
- В. И. Астащенко, Г. Ф. Мухаметзянова, В. Е. Орлянский, И. Ж. Харисов.* Упрочнение длинномерных стальных изделий методом дробеструйной обработки
- Н. Н. Сафронов, Л. Р. Харисов, Д. Р. Афлятонов.* Технология и аппаратное оформление переплава чугуна стружки электрошлаковым процессом

Прокатка и другие процессы ОМД

- А. В. Цуканов, К. В. Лицин.* Разработка автоматизированной системы машины пакетной резки прокатного производства
- 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 1

Порошковая металлургия

- С. И. Богодухов, Е. С. Козик, В. С. Гарипов.* Планирование экспериментов термической обработки изделий из порошковых сталей в электролитах.

Физика металлов

- С. А. Зайдес, Хо Минь Куан.* Оптимизация режимов маятникового поверхностного пластического деформирования для интенсификации напряженно-деформированного состояния деталей из углеродистой стали.

Машиностроительные технологии

- В. В. Максarov, М. А. Попов, В. П. Захарова.* Влияние параметров магнитно-абразивной обработки на керамический режущий инструмент для технологического обеспечения качества прецизионных изделий из хладостойких сталей.
- А. Н. Малышев, В. Д. Кухарь, А. В. Черняев, В. А. Коротков.* Испытание на растяжение образца из разнотолщинного листового материала

Экономика и финансы

- В. С. Васильцов, М. С. Ныш, А. В. Соловьева.* Управление развитием металлургической компании на основе алгоритма предынвестиционного анализа

Хроника

- Владимир Яковлевич Осадчий**

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартиль (2021)

(по версии SCIMAGO)

Разработка ситуационных моделей длительности производственных циклов изготовления партий готового проката. Сообщение 1

А. Р. Фастиковский, 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

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

² Томский политехнический университет, Томск, Россия.

³ Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

Рассмотрены задачи системного анализа и разработки сложного комплекса моделей, необходимых для построения алгоритма ситуационной (мультивариантной) оценки длительности изготовления различных партий прокатной продукции в условиях современного автоматизированного среднесортного цеха (объекта исследования), включающего жесткосвязанные производственные участки с непрерывными и циклическими технологическими процессами (подача заготовок, нагрев в методических печах, прокатка, порезка раската на полосы, охлаждение, обрезка концов пачки проката, раскрой на мерные длины, формирование и обвязка пакетов готового проката, погрузка пакетов в железнодорожные вагоны). Функционирование прокатного цеха изучали в следующем порядке: исследование технологических процессов, технических характеристик основного и вспомогательного оборудования; анализ технико-экономических показателей; выполнение хронометражных и мониторинговых наблюдений за потоком металла, работой агрегатов и оборудования; декомпозиция производственного процесса на операции, элементы и микроэлементы; анализ влияния человеческого фактора в организации производства и оперативном управлении процессами; анализ экспертных оценок реальных и возможных производственных ситуаций, связанных с выполнением заказов на готовую продукцию. Предложена классификация длительности производственных циклов: штучные (соответствуют заготовке, пачке заготовок, пакету готового проката); партийные (соответствуют партии отгрузки продукции); подсистемные и системные (относятся к участкам, отделениям, цеху в целом); технически возможные, нормативные, плановые, прогнозные и фактические. На основе предварительной разработки ситуационных партийных моделей длительности производственных циклов подразделений цеха определена ситуационная системная модель длительности производственного цикла изготовления партии готового проката путем выбора моделей подразделения, имеющего максимальную длительность цикла. Для приведения в сопоставимый вид длительности производственных циклов подсистем и системы в целом определены количественные характеристики партий проката. Построены математические модели длительности производственного цикла склада заготовок, технологической линии. Сформированы тактовые модели работы склада заготовок, технологической линии, склада готовой продукции.

Ключевые слова: среднесортный цех, производственная система, подсистемы, ситуации, ситуационные модели, длительность производственного цикла, технологическая линия, такты процессов, партия готового проката.

DOI: 10.17580/chm.2023.01.07

Введение

Для эффективного управления производственными процессами в цехах металлургических предприятий необходимы научно обоснованные нормативы длительности производственных операций, процессов и циклов [1–5]. Задачи по разработке таких нормативов решаются не в полном объеме, что в значительной степени связано с недостаточностью методического и математического обеспечения соответствующих информационно-управляющих систем [6–11]. Особенно остро это ощущается в прокатных цехах, которые являются заключительным этапом металлургического цикла

предприятия, где производственный процесс завершается выпуском готовой продукции (проката), что и определяет их значимость в производственной структуре предприятия. При неэффективном управлении производственными процессами в каждом прокатном цехе снижается ожидаемый результат из-за сверхнормативных отходов (окаины, обрезки, угара металла), нарушения технологических режимов, снижения качества проката, перерасхода топлива, электроэнергии, замедления оборачиваемости оборотных средств, увеличения себестоимости продукции, что в определенной мере зависит от взаимодействия управленческого

персонала, отсутствия обоснованной нормативной базы показателей, неполного использования возможностей систем автоматизации.

Для прокатных цехов предложена следующая классификация длительности производственных циклов по своему назначению и области применения: штучные (соответствуют заготовке, пачке заготовок (или штанг), пакету готовой продукции); партионные (соответствуют партии отгрузки продукции, партии заказа); подсистемные и системные (относятся к участкам, отделениям и цеху в целом); технически возможные, нормативные, плановые, прогнозные, фактические [12, 13]. Важными факторами, влияющими на длительность производственных циклов, являются ситуации, которые различаются числом работающего оборудования, технологическими режимами и маршрутами материальных потоков. В связи с этим далее применяется термин «ситуационные длительности производственных циклов».

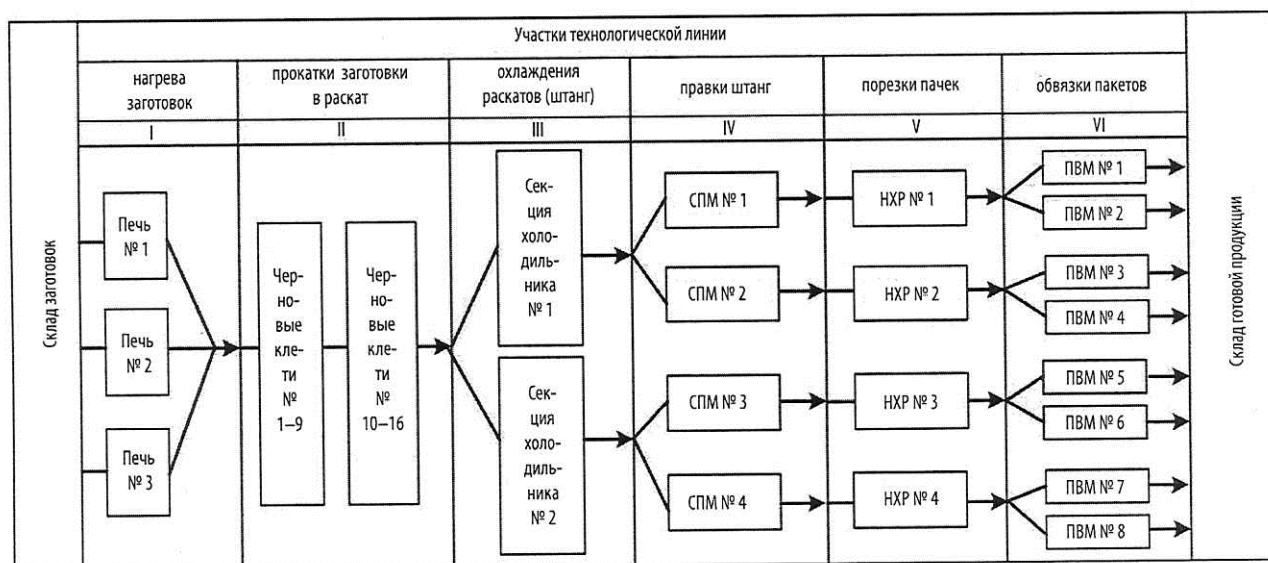
Целью исследования является создание методики ситуационного оценивания длительности производственных циклов изготовления партий готовой продукции, построение их формульных моделей для прокатного производства, а также разработка алгоритма информационной системы конкретного объекта [14–17].

Методика и объект исследования

Методика оценки ситуационных моделей длительности производственных циклов основана на проведенных исследованиях в прокатных цехах (средне- и мелкосортных, проволочных). Выявлены следующие характерные особенности прокатного производства: широкий сортамент продукции; непостоянство структуры производственного процесса; трудоемкость производства отдельных профилей; высокие скорости и температуры протекания процессов, обуславливающие значимость фактора времени; необходимость синхронизации выполнения всех производственных операций; небольшая продолжительность циклов процессов

и связанная с этим высокая частота их повторяемости; возможность достижения значительных перекрытий циклов прокатки и на основе этого повышение производительности прокатных станов [12, 13].

Методика определения длительности производственного цикла разработана на примере среднесортного цеха, в состав которого входят склад заготовок, технологическая линия из шести участков и склад готовой продукции (рисунок). На склад среднесортного цеха поступают заготовки двух видов: непрерывнолитые из кислородно-конвертерного цеха и катаные из обжимного цеха. Заготовки на участок нагрева к методическим печам могут поступать в горячем состоянии от непрерывно-заготовочного стана (НЗС) обжимного цеха или в холодном — со стеллажей склада. Поступающие заготовки нагреваются в печах до требуемой температуры и по рольгангу передаются на участок прокатки, где заготовка задается в первую рабочую клеть непрерывного стана и последовательно проходит обработку в клетях согласно схеме калибровки каждого профилеразмера. Полученный раскат при необходимости разрезается на части летучими ножницами и транспортируется на секции реечного холодильника. После охлаждения раскат, в зависимости от профиля, поступает к сортоправильной машине (СПМ) или по рольгангам передается к поперечному транспортеру для формирования пачки проката. Далее пачка раскатов (штанг) поступает на ножницы холодной резки (НХР), где происходят обрезка концов пачки и порезка на заданные мерные длины готового проката (согласно конкретному заказу). Затем они поочередно подаются по рольгангу на инспекторские стеллажи, и далее — на участок дозирования для формирования пакета готового проката на автоматизированном агрегате — пакетовязальной машине (ПВМ). Готовые пакеты взвешиваются, укладываются кранами в штабели на складе, проходят систему технического контроля в соответствии с требованиями стандарта, технических условий и результатами окончательных



Структура материальных потоков среднесортного цеха

испытаний. После этого происходят оформление документов, подготовка к отгрузке и погрузка краном пакетов партии заказов в железнодорожный вагон.

Работу среднесортного цеха изучали в следующем порядке: исследование технологии производства, технических параметров основного и вспомогательного оборудования; анализ технико-экономических показателей; проведение хронометражных и мониторинговых наблюдений за движением металла, работой отдельных агрегатов; декомпозиция производственного процесса на операции, элементы и микроэлементы; изучение влияния человеческого фактора при организации и оперативном управлении производственными процессами; проведение экспертных оценок реальных и возможных производственных ситуаций, возникающих при выполнении заказов (заданий) на продукцию [12, 13].

Структуризация ситуационных моделей длительности производственного цикла

Предлагаемые ситуационные модели длительности производственного цикла изготовления партии готового проката (партии отгрузки) в среднесортном цехе (системе) определяли на основе предварительной разработки ситуационных партионных моделей длительности производственных циклов подразделений (подсистем) цеха и последующего выбора такой модели, которая соответствует максимальным затратам времени:

$$D_{\text{ц}}^{\beta_4}(i, \text{sit}) = \max \{D_{\text{сз}}^{\beta_4}(i_0, \text{sit}); D_{\text{тн}}^{\beta_4}(i, \text{sit}); D_{\text{сгн}}^{\beta_4}(i, \text{sit})\}, \quad (1)$$

где $D_{\text{сз}}^{\beta_4}(i_0, \text{sit})$, $D_{\text{сгн}}^{\beta_4}(i, \text{sit})$ — ситуационная длительность производственных циклов на складах заготовок и готовой продукции соответственно; $D_{\text{тн}}^{\beta_4}(i, \text{sit})$ — ситуационная длительность производственного цикла технологической линии; sit — ситуация в системе; i , i_0 — профилируемый размер готового проката и заготовки соответственно.

В моделях приняты следующие обозначения индексов партий проката: β_4 — партия отгрузки готового проката (партия заказа); β_3 — пакет готового проката на выходе технологической линии; β_2 — пачка штамп, состоящая из нескольких раскатов, поступающих на ножницы холодной резки; β_1 — пачка заготовок, транспортируемых от склада до нагревательных печей.

При определении длительности производственного цикла важно правильно выбрать единицу продукции и границы (фиксационные точки) начала и окончания производственного цикла. Для технологической линии за единицу продукции штучного цикла принят пакет проката β_3 , при этом началом в данной ситуации является момент загрузки заготовки в нагревательную печь, окончанием — момент завершения операции обвязки пакета готового проката. Для склада заготовок за единицу продукции штучного цикла принята пачка заготовок β_1 , где началом производственного цикла является момент захвата краном пачки холодных заготовок со стеллажа (или момент поступления горячих заготовок на рольганг от ножниц непрерывно-заготовочного стана обжимного цеха), окончанием цикла — момент поступления заготовок к нагревательной печи. Для склада готовой продукции за единицу штучного

цикла принят пакет готового проката β_3 ; началом цикла является момент захвата краном пакета готового проката, окончанием — момент укладки пакета на стеллаж.

С целью приведения в сопоставимый вид длительности производственных циклов подсистем и системы в целом определены следующие характеристики партий проката:

– число пакетов готового проката (или заготовок) в партии отгрузки:

$$N_{\beta_4}^*(i) = \frac{G_{\beta_4}^*}{g_{\beta_3}} = \frac{G_{\beta_4}^*}{g_{\beta_3} \cdot k_p}; \quad (2)$$

– число пачек проката или заготовок или пачек заготовок в пакете:

$$N_{\beta_3}^1(i) = \frac{g_{\beta_3}}{g_{\beta_2} \cdot k_{\text{р.о}}}; N_{\beta_3}^2(i) = \frac{g_{\beta_3}}{g_{\beta_3} \cdot k_p}; N_{\beta_3}^3(i) = \frac{g_{\beta_3}}{g_{\beta_1} \cdot k_p}; \quad (3)$$

– число штамп, эквивалентных раскатам (заготовкам) в пачке проката:

$$N_{\beta_2}(i) = \frac{g_{\beta_2}}{g_{\beta_1}}; \quad (4)$$

– число заготовок в пачке на складе:

$$N_{\beta_1}(i) = \frac{g_{\beta_1}}{g_{\beta_3}}; \quad (5)$$

где $G_{\beta_4}^*$ — масса партии готового проката; g_{β_3} — масса пакета готового проката; g_{β_2} — масса заготовки (раската); k_p — расходный коэффициент металла; g_{β_2} — масса пачки проката в пакете; g_{β_1} — масса пачки заготовок; $k_{\text{р.о}}$ — расходный коэффициент металла, учитывающий окалину и обрезь.

Ситуационная математическая модель длительности производственного цикла склада заготовок имеет следующую структуру:

$$D_{\text{сз}}^{\beta_4}(i_0, \text{sit}) = D_{\text{сз}}^{\beta_1}(i_0, \Psi_{1,2}) + T_{\text{с}}^{\beta_3}(i, \text{sit}) [N_{\beta_4}^*(i) - 1]; \quad (6)$$

$$D_{\text{сз}}^{\beta_1}(i_0, \Psi_{1,2}) = \begin{cases} t_{\text{тр1}}(\Psi_1); \\ t_{\text{тр2}}(\Psi_2); \end{cases}$$

где $D_{\text{сз}}^{\beta_1}(i_0, \Psi_{1,2})$ — длительность штучного производственного цикла склада заготовок; $t_{\text{тр1}}$, $t_{\text{тр2}}$ — суммарная длительность подачи транспортными средствами (краном, рольгангом, транспортером, шлеппером) пачки заготовок от склада до нагревательной печи при режимах подачи заготовок горячими (Ψ_1) или холодными (Ψ_2); $T_{\text{с}}^{\beta_3}(i, \text{sit})$ — ситуационный такт работы производственной системы (цеха) для пакета готового проката.

Ситуационная математическая модель длительности производственного цикла технологической линии, состоящей из шести жестко связанных участков нагрева, прокатки, охлаждения, правки, порезки, пакетировки (см. рисунок), определяется формулой

$$D_{\text{тн}}^{\beta_4}(i, \text{sit}) = D_{\text{тн}}^{\beta_3}(i) + T_{\text{с}}^{\beta_3}(i, \text{sit}) [N_{\beta_4}^*(i) - 1]; \quad (7)$$

где $D_{\text{тн}}^{\beta_3}(i)$ — длительность штучного производственного цикла технологической линии при изготовлении одного пакета готового проката.

Общая формула модели $D_{\text{тл}}^{\beta 3}(i)$ включает несколько компонентов, которые имеют свою аддитивную внутреннюю структуру:

$$D_{\text{тл}}^{\beta 3}(i) = \sum_{a=1}^A t_{\text{то}}(i, a) + \sum_{r=1}^R t_{\text{тр}}(i, r) + \sum_{\gamma=1}^{\gamma} t_{\text{к}}(i, \gamma), \quad (8)$$

где $t_{\text{то}}(i, a)$, $t_{\text{тр}}(i, r)$, $t_{\text{к}}(i, \gamma)$ — длительность технологических, транспортных, контрольных операций соответственно; a, r, γ — номера операций.

Первая составляющая формулы (8) содержит следующие элементы:

$$\begin{aligned} \sum_{a=1}^{A=6} t_{\text{то}}(i, a, \Psi_{1-4}) &= t_{o1}(i, \Psi_{1,2}) + t_{o2}(i) + t_{o3}(i, \Psi_{3,4}) + \\ &+ t_{o4}(i) + t_{o5}(i) + t_{o6}(i); \quad (9) \\ t_{o1}(i, \Psi_{1,2}) &= \begin{cases} t_{o1}(\Psi_1); \\ t_{o1}(\Psi_2); \end{cases} \quad t_{o3}(i, \Psi_{3,4}) = \begin{cases} t_{o3}(\Psi_3); \\ t_{o3}(\Psi_4); \end{cases} \end{aligned}$$

где $t_{o1}(i, \Psi_{1,2})$ — технологическое время нагрева заготовки в методической печи; горячий (Ψ_1) или холодный (Ψ_2) режимы; $t_{o3}(i, \Psi_{3,4})$ — технологическое время охлаждения раската на секции холодильника для различных способов укладки штанг (Ψ_3 или Ψ_4); $t_{o2}(i)$, $t_{o4}(i)$, $t_{o5}(i)$, $t_{o6}(i)$ — технологическое время прокатки, правки, порезки и пакетировки соответственно.

Второе слагаемое формулы (8) — это длительность подачи транспортными средствами (рольгангами, шлепперами, транспортерами) заготовок, раскатов, штанг, пачек проката внутри и между участками технологической линии. Третье слагаемое формулы (8) включает длительность контрольных операций (визуального осмотра, определения соответствия размеров профиля стандарту, взятия проб для оценки механических характеристик проката).

Ситуационная математическая модель длительности производственного цикла склада готовой продукции определяется выражением

$$D_{\text{сгп}}^{\beta 4}(i, \text{sit}) = D_{\text{кр1}}^{\beta 3}(i) + T_{\text{с}}^{\beta 3}(i, \text{sit}) [N_{\beta 4}^*(i) - 1] + t_{\phi}^{\beta 4}(i) + t_{\text{кр2}}^{\beta 3}(i) \cdot N_{\beta 4}^*, \quad (10)$$

где $D_{\text{кр1}}^{\beta 3}(i)$ — длительность штучного производственного цикла (время подачи пакета готового проката краном от пакетовязальной машины на стеллаж склада); $t_{\phi}^{\beta 4}(i)$ — длительность формирования партии отгрузки (время размещения пакетов партии на площадке, финишного контроля проката, оформления документов для отгрузки); $t_{\text{кр2}}^{\beta 3}(i)$ — длительность погрузки одного пакета готового проката краном в вагон.

Модели длительности штучных производственных циклов системы

Анализ организации функционирования цеха выявил, что ведущим подразделением является технологическая линия (см. рисунок), где выполняются основные производственные процессы на участках, жестко связанных между собой (технологически и организационно) единым материальным потоком, от которого в первую очередь зависит результативность работы всей системы. Далее рассмотрена

процедура детализации моделей длительности штучных (вариантных) производственных циклов технологической линии, а затем модели длительности штучных циклов на складах подготовки заготовок к нагреву и подачи пакета готового проката на стеллаж.

Модели длительности штучных производственных циклов технологической линии для i -го профилирующего размера ($i = \overline{1, l}$) включают следующие частные модели длительности технологических операций, элементы которых перечислены в формуле (9), а также длительности транспортных и контрольных операций, указанных в формуле (8) и соответствующих пояснениях.

1. Модели длительности нагрева заготовки в методической печи:

$$t_{o1}(i, \Psi_1) = (0,75 + 0,05h) \cdot h; \quad (11)$$

$$t_{o1}(i, \Psi_2) = (4,5 + 0,01h) \cdot h \cdot \varphi, \quad (12)$$

где h — высота заготовки, см; φ — коэффициент, учитывающий температуру металла при подаче в печь.

2. Модель длительности процесса прокатки заготовки в клетях определяется как сумма начальной паузы τ_0 , машинного времени прокатки t_m и времени транспортировки раската между клетями:

$$t_{o2} = \tau_0 + t_m + \sum_{j=1}^J t_{\text{трj}}. \quad (13)$$

С учетом особенностей непрерывной прокатки с опережением, когда машинное время в клетях перекрывается временем транспортировки раската между клетями, формула (13) примет вид

$$t_{o2}(i) = \tau_0 + \sum_{j=1}^J \frac{S_{j,j+1}}{V_j} + \frac{L_p - \sum_{j=1}^J S_{j,j+1}}{V_j}; \quad (14)$$

$$L_p = l_3 \cdot \lambda; \lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_J,$$

где $S_{j,j+1}$ — расстояние между центральными осями прокатных валков j -й и $j+1$ -й клетей непрерывного стана, м; V_j — линейная скорость выхода раската из j -й клетки, м/с; L_p — полная длина раската, м; l_3 — длина исходной заготовки, м; $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_J$ — коэффициенты обжатия по клетям стана.

При $j = J$ можно записать $\frac{S_{J,J+1}}{V_J}$, что будет обозначать

время прохождения переднего конца раската от J -й клетки до холодильника.

Таким образом, значение t_{o2} равно времени прохождения металла от момента входа заготовки в первую клетку до момента входа переднего конца раската на секцию холодильника. Так как для непрерывного стана длина раската больше общего расстояния от центральной оси валков первой клетки до холодильника, то время прокатки частично перекрывается временем поступления раската на холодильник.

После выхода из последней клетки производится порезка раската на летучих ножницах при условии, что длина раската

L_p превышает полезную ширину холодильника (B_x). Предварительно осуществляется раскрой раската на части для определения числа штанг в раскате:

$$Z_{штг} = L_p / B_x; L_p / Z_{штг} = L_{штг}$$

3. Модель длительности естественного охлаждения раската (штанг) на холодильнике речного типа имеет вид

$$t_{03}(i) = 5,6 \frac{F}{\Pi} (\lg \vartheta_1 - \lg \vartheta_2), \quad (15)$$

где F — площадь поперечного сечения штанги, мм^2 ; Π — периметр штанги, мм ; ϑ_1, ϑ_2 — температуры металла на входе и выходе холодильника соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Далее оценивают длительность перемещения одного раската по длине секции холодильника с учетом шага зубчатых реек (шага раскладки раскатов на секции) и соответствия заданной температуре охлаждения металла.

4. Модель длительности правки штанг (раската) на сортоправильной машине:

$$t_{04}(i) = t_0^{04} + t_m^{04} \cdot Z_{штг}; t_m^{04} = L_{штг} / V_{04}, \quad (16)$$

где t_0^{04} — начальная пауза (подготовка раската); t_m^{04} — машинное время правки штанги, с ; V_{04} — скорость правки, м/с .

5. Модель длительности процесса порезки пачки штанг на ножницах холодной резки:

$$t_{05}(i) = (t_0^{05} + t_m^{05} + t_{тр}^{05}) / Z_{штг}; t_m^{05} = \left(\frac{L_{штг}}{r} + 1 \right); t_{рез}^1 = 60/v; \quad (17)$$

где t_0^{05} — начальная пауза (время выравнивания пачки штанг под упор), с ; t_m^{05} — машинное время порезки пачки штанг на мерные (заданные) длины, с ; $t_{тр}^{05}$ — время транспортировки пачки под ножами, с ; $Z_{штг}$ — число одновременно разрезаемых штанг (раскатов) в пачке, шт; v — число резов (ходов ножа) в единицу времени, шт/мин.

Для определения числа резов при порезке пачки штанг на мерные части необходимо провести раскрой по длине штанг $L_{штг}$ с учетом следующих факторов: заданной длины готового проката l_r^* (согласно заказу) и нормативной технологической обрезки, которая отрезается с двух концов пачки.

6. Модель длительности пакетировки готового проката на автоматизированном агрегате состоит из элементов:

$$t_{06}(i) = t_{ук} + t_{обв}; t_{ук} = t_k \cdot Z_{сл} + t_{тр,у} \cdot (Z_{сл} - 1); t_{тр,у} = \frac{l_{р,у} - l_r^*}{V_{рг}};$$

$$t_{обв} = \left(\frac{2S_{пк1}}{V_{пк1}} + \frac{d_{пк}}{V_{вг}} \right) \cdot Z_{обв} + \frac{S_{пк2}}{V_{пк2}} \cdot (Z_{обв} - 1), \quad (18)$$

где $t_{ук}$ — продолжительность набора пакета проката машиной-укладчиком, с ; $t_{обв}$ — продолжительность обвязки пакета пакетовязальной машиной, с ; t_k — длительность кантовки слоя проката магнитным кантователем, с ; $Z_{сл}$ — число слоев в готовой пачке, шт; $t_{тр,у}$ — продолжительность транспортировки одного слоя к укладчику, с ; $l_{р,у}$ — длина рольганга перед магнитным укладчиком, м ; l_r^* — длина готовой пачки, м ; $S_{пк1}$ и $S_{пк2}$ — путь поперечного и продольного перемещения пакетовязальной машины соответственно, м ; $V_{пк1}$ и $V_{пк2}$ — скорость поперечного и продольного перемещения пакетовязальной машины соответственно, м/с ;

$d_{пк}$ — диаметр обвязываемой пачки проката, м ; $V_{вг}$ — скорость перемещения вязальной головки машины, м/с ; $Z_{обв}$ — число обвязок одной пачки готового проката, шт.

В рассмотренном подразделе выполнена подробная конкретизация первого слагаемого общей модели (8) штучного производственного цикла технологической линии. Следует отметить, что второе и третье слагаемые формулы (8) относятся к транспортным и контрольным операциям в пределах технологической линии. Длительность транспортировки металла между участками рассчитывали по формуле

$$t_{тр} = \frac{L_{пр} - L_p}{V_{пр}}, \text{ где } L_{пр} \text{ и } V_{пр} \text{ — длина и линейная скорость рольганга соответственно.}$$

В некоторых случаях, связанных с перекладыванием раскатов (штанг), с дозированием металла на транспортерах, движением по шлепперам, а также с выполнением контрольных операций, длительность определяли по данным мониторинга и хронометражных наблюдений.

Таким образом, модель длительности штучного производственного цикла среднесортного цеха имеет вид

$$D_{шт}(i) = D_{сз}^{\beta 1}(i, \Psi_{1,2}) + D_{тл}^{\beta 3}(i, \Psi_{1-4}) + D_{кр1}^{\beta 3}(i);$$

$$D_{тл}^{\beta 3}(i, \Psi_{1-4}) = t_{01}(i, \Psi_{1,2}) + t_{02}(i) + t_{03}(i, \Psi_{3,4}) + t_{04}(i) +$$

$$+ t_{05}(i) + t_{06}(i) + \sum_{r=1}^R t_{тр}(i, r) + \sum_Y t_k(i, \gamma). \quad (19)$$

Модели ситуационных тактов работы производственной системы (цеха)

Ситуационные длительности производственных циклов изготовления партии готовой продукции в значительной степени зависят от ситуационных тактов работы системы [12, 13].

Модель ситуационного такта работы производственной системы (среднесортного цеха), обозначенной в формулах (6), (7) и (10), выбирают из ситуационных тактовых моделей соответствующих подсистем (подразделений):

$$T_c^{\beta 3}(i, sit) = \max\{T_{сз}^{\beta 3}(i, \Psi_{1,2}, \mu), T_{тл}^{\beta 3}(i, \Psi_{1-4}, \delta), T_{снр}^{\beta 3}(i, \sigma)\}, \quad (20)$$

где $T_{сз}^{\beta 3}(i, \Psi_{1,2}, \mu)$, $T_{тл}^{\beta 3}(i, \Psi_{1-4}, \delta)$, $T_{снр}^{\beta 3}(i, \sigma)$ — ситуационные такты работы подсистем — склада заготовок, технологической линии, склада готового проката соответственно, которые приведены к эквивалентному виду, т. е. к одной единице готового проката — пакету $\beta 3$; μ, δ, σ — обозначения ситуаций в подсистемах, определяемые числом действующего оборудования.

Ситуационные тактовые модели работы склада заготовок учитывают температурный режим и маршрут подачи металла к нагревательным печам:

– такт подачи пачки $\beta 1$ и пакета $\beta 3$ горячих заготовок от ножниц НЗС на рольганг:

$$T_{сз}^{\beta 1}(i, \Psi_1) = T_{нзс}^{\beta 1}(i, \Psi_1); T_{сз}^{\beta 1}(i, \Psi_1) = T_{сз}^{\beta 1}(i, \Psi_1) \cdot [N_{\beta 3}^3 - 1], \quad (21)$$

– такт подачи пачки $\beta 1$ и пакета $\beta 3$ холодных заготовок от стеллажа на загрузочную решетку:

$$T_{сз}^{\beta 1}(i, \Psi_2) = t_{кр}^{\beta 1}; T_{сз}^{\beta 3}(i, \Psi_2, \mu) = \frac{T_{сз}^{\beta 1}}{Z_{кр}} [N_{\beta 3}^3 - 1], \quad (22)$$

Ситуационное сочетание числа работающего оборудования на участках технологической линии среднесортного цеха

Ситуации δ	Участок технологической линии					
	нагрев	прокатка	охлаждение	правка	порезка	пакетировка
	Максимальное число агрегатов на участках					
	$Z_{пч} = 3$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 2$	$Z_{пр} = 4$	$Z_{нж} = 4$	$Z_{па} = 8$
$\delta 1$	$Z_{пч} = 1, \psi_1$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 1, \psi_3$	$Z_{пр} = 1$	$Z_{нж} = 1$	$Z_{па} = 2$
$\delta 2$	$Z_{пч} = 2, \psi_2$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 1, \psi_4$	$Z_{пр} = 2$	$Z_{нж} = 2$	$Z_{па} = 4$
....						
$\delta \Delta$	$Z_{пч} = 2, \psi_2$	$Z_{кл} = 1$	$Z_x = 2, \psi_3$	$Z_{пр} = 4$	$Z_{нж} = 4$	$Z_{па} = 6$

где $T_{сз}^{\beta 3}(i, \psi_1)$ — такт работы ножниц НЗС при порезке полосы на заготовки заданной длины; $N_{\beta 3}^3(i_0)$ — число пачек заготовок $\beta 1$ в одном пакете готового проката; $t_{кр}^{\beta 1}$ — такт (цикл) работы крана; $Z_{сз}^{кр}$ — число параллельно работающих кранов в пролетах при подаче пачек заготовок на загрузочные решетки ($\mu = Z_{сз}^{кр}$).

Ситуационная тактовая модель работы склада готовой продукции:

$$T_{сгп}^{\beta 3}(i) = t_{кр}^{\beta 3}(i); T_{сгп}^{\beta 3}(i, \sigma) = t_{сгп}^{\beta 3}(i) / Z_{сгп}^{кр}, \quad (23)$$

где $t_{кр}^{\beta 3}$ — такт (цикл) работы крана (подача одного пакета готового проката от вязальной машины на стеллаж и возврат крана к машине); $Z_{сгп}^{кр}$ — число параллельно работающих кранов в пролетах склада ($\sigma = Z_{сгп}^{кр}$).

Ситуационные тактовые модели работы технологической линии предложено определять на основе тактовых моделей производственных участков в два этапа:

1) определение ситуационных тактов каждого участка в зависимости от такта работы единицы оборудования T_1^y и числа параллельно функционирующего оборудования ($Z_{об}$):

$$T_{тл}^y(i, Z_{об}) = \frac{T_1^y(i)}{Z_{об}}; \quad T_1^y(i) = \begin{cases} \frac{t_{то}(i)}{E_{то}}, & \text{при } t_{то} = \{t_{о1}, t_{о3}\}; E_{то} = \{E_{пч}, E_x\}; \\ t_{то}(i), & \text{при } t_{то} = \{t_{о2}, t_{о4}, t_{о5}, t_{о6}\}; \end{cases} \quad (24)$$

2) выбор ситуационного такта работы технологической линии (подсистемы) с учетом ситуационных сочетаний числа используемого оборудования по участкам с применением следующего математического оператора:

$$T_{тл}^{\beta 3}(i, \psi_{1-4}, \delta) = \max\{T_{тл}^y(i, \psi_1, Z_{пч}); T_{тл}^y(i, \psi_2, Z_{пч}); T_{тл}^y(i, \psi_3, Z_x); T_{тл}^y(i, \psi_4, Z_x); T_{тл}^y(i, Z_{пр}); T_{тл}^y(i, Z_{нж}); T_{тл}^y(i, Z_{па})\}, \quad (25)$$

где $T_{тл}^y, T_{тл}^y, \dots, T_{тл}^y$ — ситуационные такты работы участков нагрева, прокатки, охлаждения, правки, порезки, пакетировки; $\delta = \{Z_{пч}, Z_x, Z_{пр}, Z_{нж}, Z_{па}\}$ — число параллельно действующего оборудования (нагревательных печей, секций холодильника, правильных машин, ножниц холодной резки, пакетировочных агрегатов).

Главным участком технологической линии является прокатный стан, где при последовательной обработке в клетях происходит формоизменение заготовки в готовый профиль.

Остальные участки считаются вспомогательными и предназначены для выполнения требуемых дополнительных операций и обеспечения бесперебойной работы стана.

Тактовая модель работы участка прокатки учитывает особенности функционирования непрерывного стана, где такты в каждой клетке одинаковые, что соответствует закону постоянства секундных объемов металла, проходящих через клетки. Расчет такта выполняется для первой клетки по формулам (13) и (14):

$$T_{кл}^{y2}(i) = \tau_0^{y2} + \frac{l_3 \cdot \lambda_1}{V_1}; T_{тл}^{y2}(i) = T_{кл}^{y2}(i) \cdot [N_{\beta 3}^2 - 1], \quad (26)$$

где λ_1, V_1 — коэффициент вытяжки и линейная скорость прокатки заготовки в первой клетке соответственно.

Тактовые модели работы участка нагрева сформированы с учетом формул (11) и (12):

$$T_{тл}^{y1}(i, \psi_1, Z_{пч}) = \frac{t_{о1}(i, \psi_1)}{E_{пч} \cdot Z_{пч}} \cdot [N_{\beta 3}^2 - 1]; \quad T_{тл}^{y1}(i, \psi_2, Z_{пч}) = \frac{t_{о1}(i, \psi_2)}{E_{пч} \cdot Z_{пч}} \cdot [N_{\beta 3}^2 - 1]; \quad (27)$$

$$E_{пч} = \frac{L_{пч}}{b_3 \cdot l_3}; l_3 = \psi_6 - b_3,$$

где $E_{пч}$ — емкость методической печи с шагающими балками, шт.; $L_{пч}$ — длина полезного пода печи, м; l_3 — интервал между заготовками, м; ψ_6 — шаг балки печи, м; b_3 — ширина заготовки, м.

Тактовая модель работы участка охлаждения построена с учетом формулы (15):

$$T_{тл}^{y3}(i, \psi_3, Z_x) = \tau_0^{y3} + \frac{t_{о3}(i)}{E_x^1(\psi_3) \cdot Z_x} \cdot [N_{\beta 3}^2 - 1]; \quad (28)$$

$$E_x^1(\psi_3) = \frac{L_x}{\psi_3(\psi_3)}, \text{ в раскатах}; \quad E_x^1(\psi_3) = \frac{L_x}{\psi_3(\psi_3)} \cdot Z_{штг}, \text{ в штангах}; \quad (29)$$

$$T_{тл}^{y3}(i, \psi_4, Z_x) = \tau_0^{y3} + \frac{t_{о3}(i)}{E_x^1(\psi_3) \cdot Z_x} \cdot [N_{\beta 3}^2 - 1]; \quad (30)$$

$$E_x^1(\psi_4) = \frac{L_x}{2\psi_3(\psi_4)}, \text{ в раскатах}; \quad E_x^1(\psi_4) = \frac{L_x}{2\psi_3(\psi_4)} \cdot Z_{штг}, \text{ в штангах}, \quad (31)$$

где τ_0 — начальная пауза (время перекалывания раската с рольганга на секцию холодильника); E_x^1 — емкость секции

холодильника; L_x — длина секции холодильника; Ψ_3 — шаг зубчатой рейки; $Z_{штг}$ — количество штанг (частей) в одном раскате; $\Psi_3 = \Psi_4 = 2\Psi_3$ — шаг укладки раската (штанг) на каждый зуб или через зуб рейки холодильника.

Тактовые модели работы соответствующих участков правки, порезки, пакетировки вычисляли по формулам (16), (17), (18):

$$T_{тл}^4(i, Z_{пр}) = \frac{t_{о4}(i)}{Z_{пр}} \cdot [N_{\beta 3}^2 - 1]; T_{тл}^5(i, Z_{нж}) = \frac{t_{о5}(i)}{Z_{нж}} \cdot [N_{\beta 3}^1 - 1];$$

$$T_{тл}^6(i, Z_{па}) = \frac{t_{о6}(i)}{Z_{па}}. \quad (32)$$

Ситуационное моделирование работы технологической линии для выбора рациональных тактов ее функционирования осуществляется посредством перебора возможного числа оборудования на участках в соответствии с формулой (25). В таблице показан фрагмент возможных производственных ситуаций при различных сочетаниях числа оборудования на участках для оценивания тактов работы подсистемы.

Пример такта работы технологической линии для ситуации 62 на основе тактов участков в формульном выражении выглядит следующим образом:

$$T_{тл}(\delta 2) = \max\{T_{н}^Y(Z_{пч} = 2, \Psi_2); T_{кл}^Y(Z_{кл} = 1); T_x^Y(Z_x = 1, \Psi_3);$$

$$T_{пр}^Y(Z_{пр} = 1); T_{нж}^Y(Z_{нж} = 3); T_{па}^Y(Z_{па} = 4)\},$$

где такты участков соответствуют формулам (23), (24), (26)–(32).

Таким образом сформированы ситуационные эквивалентные тактовые модели на пакет готовой продукции $\beta 3$ для склада заготовок — формулы (21) и (22); склада готовой продукции — формула (23); технологической линии — формулы (25)–(30). Единый такт работы всей производственной системы (цеха) выбирается с учетом различных ситуаций функционирования цеха, определяемых числом используемого технологического и кранового оборудования в каждой подсистеме и системе в целом, на основе предлагаемой формулы (20).

Выводы

Проведено исследование решения сложной задачи построения ситуационных моделей оценивания длительности производственных циклов изготовления партий готового проката на примере производственной системы. Разработанный комплекс моделей включает следующие основные составляющие: базовую модель определения ситуационной длительности производственных циклов системы путем выбора максимальной оценки длительности производственных циклов подсистем; ситуационные партионные (на партию отгрузки) модели циклов подсистем (склада заготовок, технологической линии, склада готовой продукции); модели длительности штучных (на пакет готового проката) производственных циклов; локальные модели длительности технологических транспортных и контрольных операций. С целью приведения к сопоставимому виду длительности производственных циклов установлены разновидности партий проката: партия отгрузки, пакет готового проката, пачка

штанг, пачка заготовок. Определены поэтапные модели ситуационных тактов работы подсистем и системы в целом. Перечисленные модели положены в основу алгоритма оценивания длительности изготовления партий готового проката, который в укрупненном виде будет представлен в следующем сообщении.

Библиографический список

1. Муравьева Г. Ю. Комплексный подход к определению длительности производственного цикла в отраслях с нештучным учетом выпускаемой продукции // Научные ведомости. 2016. № 2 (223). Вып. 37. С. 38–41.
2. Толмачева Е. А. Прогнозирование объема отгруженной продукции на промышленных предприятиях // Гуманитарные научные исследования. 2016. № 5 (57). С. 193–196.
3. Geraskin M. I., Egorova V. V. The algorithm for dynamic optimization of the production cycle in bearing industry // Information Technology and Nanotechnology. 2016. Vol. 1638. P. 552–568.
4. Malindžák D. Application of logistic principles in metallurgical production // Metalurgija. 2012. Vol. 51. No. 3. P. 345–348.
5. Lenort R., Feliks J. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies // Metal. 2013. No. 5. P. 15–17.
6. Šnapka P., Mikušová M., Janovská K., Samolejová A. Simulation model of metallurgical production management // Metalurgija. 2013. Vol. 52. No. 2. P. 429–431.
7. Malindžák D., Gazda A., Malindžáková M., Vitko D. The basic principles and rules for heuristic model creation in metallurgy // Metalurgija. 2013. Vol. 52. No. 4. P. 549–552.
8. Ташевский А. Г. Математические модели продолжительности жизненного цикла технических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 1 (190). С. 169–178.
9. Анисимова Э. С. Моделирование производственной поточной линии // Экономика и социум. 2015. № 3 (16). С. 29–34.
10. Sanja S., Dragan Č., Dejan Đ., Minovski R. The production cycle time in serial production: Reduction of the duration in metal processing industry case // Istrazivanja i projektovanja za privredu. 2013. Vol. 11. P. 115–122.
11. Helbing Dirk. Modeling and optimization of production processes: Lessons from Trac Dynamics. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/246848443_Modeling_and_Optimization_of_Production_Processes_Lessons_from_Trac_Dynamics (дата обращения: 11.01.2023).
12. Кадыков В. Н., Мусатова А. И., Койнов Р. С. Разработка комплекса нормативных моделей функционирования подразделений металлургического предприятия // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 62. № 8. С. 606–610. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-8-606-610.
13. Фастыковский А. Р., Мусатова А. И., Кадыков В. Н. Определение нормативной длительности производственного цикла в прокатных цехах // Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Часть 2 / под ред. А. Б. Юрьева. — Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2021. — 347 с.
14. Кретьова Ю. И., Цирульниченко Л. А. Математическое моделирование как эффективный инструмент прогнозирования и управления производственными процессами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2018. Т. 6. № 1. С. 5–13.
15. Grznár P., Gregor M., Krajčovič M., Mozol Š., Schickerle M., Vavřík V., Durica L., Marschall M., Bielik T. Modeling and simulation of processes in a factory of the future // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 13. 4503. DOI: 10.3390/app10134503.
16. Kübler F., Böhrer 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.
17. Kourentzes N., Trapero J. R., Barrow D. K. Optimising forecasting models for inventory planning // International Journal of Production Economics. 2019. Vol. 225. 107597. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107597.

"Chernye metally", 2023, No. 1, pp. 44–51
DOI: 10.17580/chm.2023.01.07

Development of situation models for duration of production cycles of manufacturing finished rolled products. Message 1

Information about authors

A. R. Fastyskovsky, Dr. Eng., Associate Prof., Head of the Dept. of Metal Processing and Metal Science EVRAZ ZSMK¹, e-mail: fastyskovsky@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. Martyshev, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metal Science², e-mail: martyshev@tpu.ru;

A. I. Karlina, Cand. Eng., Reserarcher³, e-mail: karlinat@mail.ru

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

³ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

Abstract: The problems of system analysis and development of a complex set of models necessary for constructing an algorithm for situational (multivariate) estimation of the duration of production of different batches of rolled products in the conditions of a modern automated medium-sized shop (object of study), including rigidly connected production sections with continuous and cyclic technological processes (feeding blanks, heating in method furnaces, rolling, cutting the rolled stock into strips, cooling, trimming the ends of the bundles of rolled stock, cutting to cut lengths, forming and tying bundles of finished rolled products, loading bundles into railway cars). The study of the functioning of the rolling shop was carried out in the following order: the study of technological processes; technical characteristics of the main and auxiliary equipment; analysis of technical and economic indicators; performance of chronometric and monitoring observations of the metal flow, the operation of units and equipment; decomposition of the production process into operations, elements and trace elements; analysis of the influence of the human factor in the organization of production and operational management of processes; analysis of expert assessments of real and possible production situations related to the fulfillment of orders for finished products. The duration of production cycles is proposed to be classified as follows: piece (corresponding to a workpiece, a pack of workpieces, a package of finished rolled products); batch (corresponding to the shipment of products); subsystem and system (related to sections, departments, workshop as a whole); technically possible, normative, planned, predictive and actual. Based on the preliminary development of situational batch models of the duration of production cycles of the departments of the shop, a situational system model of the duration of the production cycle for manufacturing a batch of finished rolled products is determined by selecting the models of the unit with the maximum cycle duration. To bring the duration of the production cycles of subsystems and the system as a whole into a comparable form, the quantitative characteristics of rolled products batches are determined. Mathematical models of the duration of the production cycle of the warehouse of blanks are built; technological line. The clock models of work of the warehouse of blanks, the production line, the warehouse of finished products have been formed.

Key words: medium-sized shop, production system, subsystems, situations, situational models, duration of the production cycle, technological line, process cycles, batch of finished rolled products.

References

1. Muravyev G. Yu. An integrated approach to determine the production cycle duration in industries with non-piece accounting for manufactured products. *Nauchnye vedomosti*. 2016. No. 2 (223). Iss. 37. pp. 38–41.
2. Tolmachev E. A. Forecasting the volume of shipped products at industrial enterprises. *Gumanitarnye nauchnye issledovaniya*. 2016. No. 5 (57). pp. 193–196.
3. Geraskin M.I., Egorova V.V. The algorithm for dynamic optimization of the production cycle in bearing industry. *Information Technology and Nanotechnology*. 2016. Vol. 1638. pp. 552–568.
4. Malindžak D. Application of logistic principles in metallurgical production. *Metallurgija*. 2012. Vol. 51. No. 3. pp. 345–348.
5. Lenort R., Feliks J. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies. *Metal*. 2013. No. 5. pp. 15–17.
6. Šnapka P., Mikušová M., Janovská K., Samolejová A. Simulation model of metallurgical production management. *Metallurgija*. 2013. Vol. 52. No. 2. pp. 429–431.
7. Malindžak D., Gazda A., Malindžaková M., Vitko D. The basic principles and rules for heuristic model creation in metallurgy. *Metallurgija*. 2013. Vol. 52. No. 4. pp. 549–552.
8. Tashevskiy A. G. Mathematical models of the life cycle duration for technical systems. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2014. No. 1 (190). pp. 169–178.
9. Anisimova E. S. Simulation of a production line. *Ekonomika i sotsium*. 2015. No. 3 (16). pp. 29–34.
10. Stanislavjev S., Čockalo D., Đorđević D., Minovski R. The production cycle time in serial production: Reduction of the duration in metal processing industry case. *Istrazivanja i projektovanja za privredu*. 2013. Vol. 11. pp. 115–122.
11. Helbing D. Modeling and Optimization of Production Processes: Lessons from Trac Dynamics. 2014. March. https://www.researchgate.net/publication/246848443_Modeling_and_Optimization_of_Production_Processes_Lessons_from_Trac_Dynamics
12. Kadykov V. N., Musatova A. I., Koynov R. S. Development of a set of normative models for the functioning of divisions of a metallurgical enterprise. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2021. Vol. 62. No. 8. pp. 606–610. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-8-606-610.
13. Fastyskovskiy A. R., Musatova A. I., Kadykov V. N. Determination of the standard duration of the production cycle in rolling shops. *Metallurgy: technologies, innovations, quality: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. Part 2*. Novokuznetsk: Izdatelskiy tsentr SibGIIU, 2021. 347 p.
14. Kretova Yu. I., Tsurulnichenko L. A. Mathematical modeling as an effective tool for forecasting and managing production processes. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii*. 2018. Vol. 6. No. 1. pp. 5–13.
15. Grznár P., Gregor M., Krajčovič M., Mozol Š., Schickler M., Vavřík V., Durica L., Marshall M., Bielik T. Modeling and simulation of processes in a factory of the future. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 3. 4503. DOI: 10.3390/app10134503.
16. 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.
17. Kourntzes N., Trapero J., Barrow D. Optimising forecasting models for inventory planning. *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 255. 107597. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107597.

Владимир Яковлевич Осадчий (1928–2022)

11 декабря 2022 г. на 95-м году ушел из жизни профессор, докт. техн. наук, академик Международной академии информатизации при ООН, лауреат Государственной премии СССР, премии Правительства РФ и премии им. М. Л. Мила, заслуженный деятель науки и техники РФ, почетный работник высшего образования Владимир Яковлевич Осадчий.

В 1946 г. Владимир Яковлевич с золотой медалью окончил школу в Первоуральске, в 1951 г. — с отличием Уральский политехнический институт. В 1954 г. в МИСиС он защитил кандидатскую, а в 1968 г. — докторскую диссертацию. В 1970 г. В. Я. Осадчий возглавил кафедру обработки металлов во Всесоюзном заочном машиностроительном институте (ВЗМИ, сейчас — Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и информатики), которой он руководил на протяжении 40 лет. Им были разработаны и внедрены в производство новые прошивные станы поперечно-винтовой прокатки с грибовидными валками и индивидуальным приводом, а также обкатные трехвалковые станы, установленные на Челябинском, Синарском и Днепропетровском трубных заводах. Впервые в мировой практике СКБ им. М. Л. Мила совместно с Челябинским трубопрокатным заводом были разработаны конструкция и технология изготовления цельнометаллического лонжерона лопасти винта сверхтяжелого вертолета Ми-26, установившего восемь мировых рекордов. В. Я. Осадчий является автором 454 научных трудов и 160 изобретений. Под его научным руководством защищены 72 кандидатские и 8 докторских диссертаций.

Светлая память о В. Я. Осадчем навсегда останется в сердцах его учеников, друзей и товарищей.

Издательский дом «Руда и Металлы», редакция и редакционный совет журнала «Черные металлы» выражают свои глубокие соболезнования родным и близким В. Я. Осадчего.