

УДК 519.713

Определение временных характеристик листопрокатного процесса

О.А. Криводубский, С.А. Косилов, А.В. Ильчишин
Донецкий национальный технический университет
krivodyubskij@mail.ru

Abstract

Krivodubsky O.A., Kosilov S.A., Ilchishin O.V. Definition of Time Characteristics of the Sheet Rolled Metal Planning. By methods of system analysis and information technologies formalize logical-formal links between variables characterizing the process and time characteristics, duration of waiting and sequence of putting half-products into the production process.

Общая постановка проблемы. Одним из применений информационных технологий является повышение эффективности принятия решений в планировании и оперативном управлении прокатным производством. Информационные технологии позволяют повысить эффективность технологических процессов за счёт оптимальной организации производства, в частности, с помощью разработки алгоритмов упорядочения выполняемых задач. На производстве, как правило, задачи упорядочения сложных процессов решаются на основании интуитивных рассуждений и принятие решения осуществляется без обоснования его оптимальности. Данное исследование направлено на разработку методики и алгоритмов составления расписания для листопрокатного производства, которые могут быть применимы к ряду объектов с аналогичной структурой.

Постановка задач исследования. С помощью методов системного анализа и информационных технологий формализовать логико-формальные связи между переменными, характеризующими процесс и временными характеристиками процесса, длительностью ожиданий и последовательностью задания партий заготовок в производство.

Анализ исследований и публикаций. Листопрокатное производство можно рассматривать как систему с детерминированными характеристиками. Существующие подходы к составлению расписания для таких систем представлены в [1]-[4], однако констатируется, что универсальный подход ещё не разработан. Аппарат дискретной математики, который может быть использован при формализации взаимосвязей между переменными изложен в [5]-[8]. Основы листопрокатного производства рассматриваются в [9]-[10].

Решение задач и результаты исследований. Поскольку поставка заготовок в виде мерных слябов осуществляется из мартеновского цеха, то задача планирования заключается в том, чтобы определить время

поступления, количество мерных слябов и определить временные характеристики процесса. Портфель заказов содержит марку стали и типоразмеры готовой продукции – прокатных листов. В соответствии с этим, при решении задачи планирования листопрокатного производства выделяются следующие этапы:

- объединение поступивших заказов в группы по типоразмерам заказанных листов,
- формирование на основании полученных групп партий заготовок (кратных слябов) для проката,
- установление последовательности задания партий кратных слябов в производство с учётом технологических особенностей и ограничений производства,
- определение временных характеристик обработки партий кратных слябов на устройствах листопрокатного цеха,
- задание времени поставки мерных слябов мартеновским цехом для каждой прокатной партии.

На первом и втором этапах решения задачи планирования были сформированы партии $SK_{l,c}$ кратных слябов для задания в производство (где $l = \overline{I; II}$ – порядковый номер кампании валков, в которой прокатывается партия, $c = \overline{I; cI_l}$ – порядковый номер партии в кампании валков). В данной статье рассматриваются и определяются временные характеристики обработки сформированных партий $SK_{l,c}$ кратных слябов на устройствах прокатного цеха, для чего необходимо:

- определить последовательность обработки кратных слябов одной партии на каждой группе устройств и последовательность прохождения устройств каждым кратным слябом,
- установить последовательность прохождения партий кратных слябов через устройства цеха; определить факторы, влияющие на продолжительность прохождения партий по устройствам (время ожидания одного сляба и всей

партии перед устройством, время простаивания устройства, влияние продолжительности обработки партии на продолжительность обработки последующих партий),

- с учётом установленных факторов определить временные характеристики: продолжительность и время окончания обработки каждой партии на каждой группе устройств, продолжительность и время окончания обработки каждой партии на всех устройствах прокатного цеха, продолжительность и время окончания обработки всех партий на всех устройствах прокатного цеха.

Для определения последовательности обработки партий кратных слябов на устройствах цеха формализуем структуру листопркатного цеха в виде рис. 1. Объединим в блоки последовательно расположенные устройства, выполняющие похожие операции (нагрев кратных слябов в печах; прокатка; охлаждение и порезка, отгрузка потребителю).

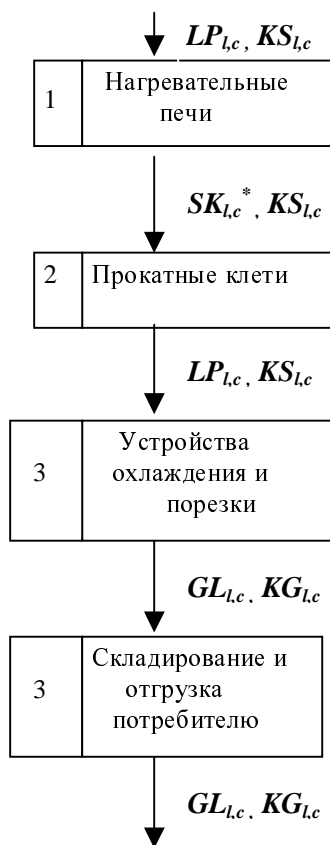


Рисунок 1 – Структура листопркатного цеха и схема движения металла.

Преобразование металла при прохождении устройств, объединённых в блоки на рис.1, характеризуют переменные:

- $SK_{l,c}$ - характеристики партий кратных

слябов, $KS_{l,c}$ - количество кратных слябов в партии,

- $SK_{l,c}^*$ - характеристики партий кратных слябов, нагретых в печах,

- $LP_{l,c}$ - характеристики партий прокатных листов, полученных после прокатки,

- $GL_{l,c}$ - характеристики партий готового проката, полученного после порезки, $KG_{l,c}$ - количество готовых листов в партии.

Согласно технологическим особенностям и ограничениям процесса, обработка партий на блоках устройств организована в следующей последовательности. Кратные слябы партии $SK_{l,c}$ загружаются в нагревательные печи последовательно один за другим и нагреваются до температуры прокатки. При загрузке в печь сляб выталкивается из соответствующего ряда печи нагретый сляб на рольганг подачи к прокатным клетям. Время выдачи сляба из печи определяется тремя факторами: минимально и максимально допустимой продолжительностью нагрева (нормативные значения, зависящие от марки стали и типоразмера сляба) и временем окончания обработки предыдущего сляба на следующем в технологической цепочке устройстве - клетки «трио». После нагрева кратный сляб партии $SK_{l,c}$ без задержки прокатывают последовательно на клетки «трио» и на клетки «кварто» до получения прокатного листа партии $LP_{l,c}$. Затем лист направляется на устройства предварительного охлаждения, порезки и готовый прокат партии $GL_{l,c}$ отгружается потребителю.

Установим факторы, влияющие на продолжительность прохождения партий по устройствам цеха. Согласно технологическим особенностям, загрузка в печи первого кратного сляба следующей партии $SK_{l,c+1}$ осуществляется сразу после загрузки последнего сляба предыдущей партии $SK_{l,c}$. Ожидание кратных слябов перед обработкой на блоке имеет место только перед прокатными клетями (блок2), так как кратные слябы должны поступать на клеть «трио» из нагревательных печей (блок1) без задержки и затем без задержки быть прокатаны на клетки «кварто». При этом кратные слябы ожидают своей очереди в нагревательной печи, но не дольше, чем максимально допустимая продолжительность нагрева. Начиная с устройств блока2 кратные слябы каждой партии $SK_{l,c}$ и сами партии $SK_{l,c}$ проходят по стану последовательно один за одним без задержек.

В силу вышеизложенного, определим временные характеристики обработки партий на устройствах цеха в следующей последовательности:

- установим продолжительность обработки одного кратного сляба или прокатного листа на каждом из блоков устройств цеха с учётом ожидания и ограничений; определим продолжительность обработки партии кратных слябов или партии прокатных листов на каждом блоке,
- определим время окончания обработки каждой партии на каждой группе устройств,
- найдём продолжительность прохождения каждой партии через все блоки,
- определим продолжительность прохождения всех партий через все блоки.

Рассмотрим преобразования металла на устройствах каждого блока.

1. Нагревательные печи (блок 1).

В нагревательных печах кратные слябы нагреваются до температуры начала прокатки. При поступлении в печь кратный сляб выталкивает из соответствующего ряда печи крайний сляб на транспортёр подачи к клетки "трио". Схема движения кратных слябов через печи представлена на рис.2.

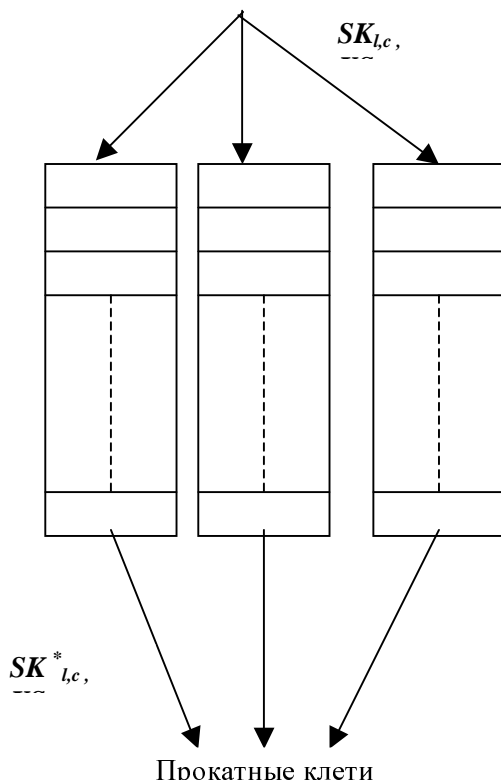


Рисунок 2 – Движение слябов через нагревательные печи.

Для определения продолжительности нагрева одного кратного сляба партии $SK_{l,c}$

вычислим количество $CP_{l,c}$ кратных слябов партии $SK_{l,c}$ в одно загрузке печей:

$$CP_{l,c} = 2 \times NP_{l,c} \times E(L / BS_{l,c}) \quad (1),$$

где: $BS_{l,c}$ - ширина кратного сляба, $NP_{l,c}$ - количество печей, работающих при нагреве слябов партии $SK_{l,c}$ (определяется согласно графика ремонтов печей в планово-производственном отделе), $E(L / BS_{l,c})$ - количество кратных слябов, помещающихся в одном ряду нагревательной печи,

$L = 28200$ (мм) - длина рабочей части каждой печи, 2 - количество рядов в каждой печи.

Отметим, что для упрощения вычислений далее будем рассматривать, вместо $NP_{l,c}$ двухрядных печей с длиной L рабочей части каждой печи, одну двухрядную печь с длиной рабочей части $NP_{l,c} \cdot L$, поскольку (с учётом изложенной выше процедуры загрузки слябов в печи) время пребывания слябов в печи у таких систем будет одинаково.

Тогда количество $CZ_{l,c}$ загрузок печей кратными слябами партии $SK_{l,c}$:

$$CZ_{l,c} = E\left(\frac{KS_{l,c}}{CP_{l,c}}\right) + 1 \quad (2)$$

Продолжительность $DI_{l,c}$ нагрева одного кратного сляба партии $SK_{l,c}$ (т.е. продолжительность нагрева одной загрузки печей для партии $SK_{l,c}$) определим согласно (3):

$$DI_{l,c} = TMIN_{l,c} + TZ_{l,c} \quad (3),$$

где $TMIN_{l,c}$ - минимально допустимая продолжительность нагрева одного сляба партии $SK_{l,c}$ (её значение определяется по таблицам в зависимости от марки стали партии), $TZ_{l,c}$ - продолжительность ожидания в печах нагретых кратных слябов одной загрузки.

Определим продолжительность ожидания $TZ_{l,c}$. Ожидание обусловлено тем, что для соблюдения температуры прокатки после выхода из печи сляб должен поступать на прокатную

клеть «трио» без остановки в момент окончания обработки на клетки предыдущего сляба, а после клетки «трио» без остановки поступать на клеть «кварто». Следовательно, если продолжительность прокатки всех слябов одной загрузки печи на одной из клеток больше минимально допустимой продолжительности $TMIN_{l,c}$ нагрева одной загрузки этой партии, то слябы каждой загрузки задерживаются в печи дольше $TMIN_{l,c}$ на время $TZ_{l,c}$:

$$\begin{aligned} DM_{l,c} &= \max(DT2_{l,c}, DK2_{l,c}) \\ \text{при } DM_{l,c} \times CP_{l,c} &> TMIN_{l,c} : \\ TZ_{l,c} &= DM_{l,c} \times CP_{l,c} - TMIN_{l,c} \\ \text{при } DM_{l,c} \times CP_{l,c} &< TMIN_{l,c} : \\ TZ_{l,c} &= 0 \end{aligned} \quad (4),$$

где $DT2_{l,c}, DK2_{l,c}$ - продолжительности прокатки одного кратного сляба партии $SK_{l,c}$ на клетки «трио» и клетки «кварто»; значения этих величин стандартны и зависят от типоразмеров кратных слябов партии и катаемого в партии листа.

Для определения продолжительности $DPI_{l,c}$ нагрева всей партии $SK_{l,c}$ учтём, что первая загрузка печи слябами партии $SK_{l,c}$ (кроме первой партии $SK_{l,1}$ в каждой кампании валков, которая нагревается во время перевадки) нагревается в печи во время прокатки слябов предыдущей партии $SK_{l,c-1}$. Поэтому первый кратный сляб партии $SK_{l,c}, c \neq 1$ задерживается в печи дольше $TMIN_{l,c}$ на время $TZP_{l,c}$:

$$\begin{aligned} \forall c \neq 1 \\ DM_{l,c-1} &= \max(DT2_{l,c-1}, DK2_{l,c-1}) \\ \text{при } DM_{l,c-1} \times CP_{l,c-1} &> TMIN_{l,c} : \\ TZP_{l,c} &= DM_{l,c-1} \times CP_{l,c-1} - TMIN_{l,c} \\ \text{при } DM_{l,c-1} \times CP_{l,c-1} &< TMIN_{l,c} : \\ TZP_{l,c} &= 0 \\ TZP_{l,1} &= 0 \quad \forall l \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда продолжительность $DN_{l,c}$ нагрева первой загрузки печи кратными слябами партии $SK_{l,c}$ с учётом ожидания $TZP_{l,c}$ первого сляба партии определим согласно (6):

$$DN_{l,c} = DI_{l,c} + TZP_{l,c} \quad (6)$$

Согласно вышеизложенному,

продолжительность $DPI_{l,c}$ нагрева всех кратных слябов партии $SK_{l,c}$ с учётом всех ожиданий определим согласно (7):

$$DPI_{l,c} = DN_{l,c} + DI_{l,c} \times KS_{l,c} / CP_{l,c} \quad (7)$$

Для учёта ограничения на максимально допустимую продолжительность $TMAX_{l,c}$ нагрева одного сляба партии $SK_{l,c}$ (её значение определяется по таблицам в зависимости от марки стали партии) отметим, с учётом (3) и (6), что дольше других нагревается первая загрузка печи, продолжительность нагрева которой $DN_{l,c}$. Тогда, если $DN_{l,c} > TMAX_{l,c}$, то технологические особенности и вместимость нагревательных печей не позволяют нагреть слябы без перегрева и при такой последовательности партий прокатка не может быть выполнена и необходима корректировка производственной программы. При $DN_{l,c} \leq TMAX_{l,c}$ условие на максимально допустимую продолжительность нагрева одного кратного сляба выполняется и партия может быть прокатана.

После нагрева кратные слябы партии направляются по рольгангам на прокатку к клетям «трио» и «кварто». Отметим, что дальнейшее прохождение металла по прокатному стану выполняется без ожидания перед обработкой на устройствах очередного блока, поскольку процесс прокатки выполняется непрерывно для сохранения требуемой температуры прокатки.. Слябы ожидают только в печах очереди перед прокаткой и продолжительность ожидания учтена при определении величин задержек $TZ_{l,c}$ и $TZP_{l,c}$.

2. Прокатные клетки «трио» и «кварто» (блок2).

Для определения продолжительности $DT2_{l,c}$ прокатки одного сляба на клетки «трио» используем коэффициент $KT_{l,c,p}$ обжатия листа на p -м пропуске через клеть «трио», определяемый как отношение величины обжатия к толщине раската до обжатия:

$$\begin{aligned} \forall p = \overline{1; pI_{l,c}} \\ KT_{l,c,p} &= \\ &= (HR_{l,c,p-1} - HR_{l,c,p}) / HR_{l,c,p-1} \end{aligned} \quad (8),$$

где $HR_{l,c,p}$ - толщина раската после p -

го пропуску через клеть.

Для каждой партии $SK_{l,c}^*$ кратных слябов значения коэффициента $KT_{l,c,p}$ и количество $pI_{l,c}$ проходов раската через клеть определяются в производственном отделе исходя из технологических особенностей прокатки и в зависимости от марки стали и типоразмеров заказанного листа.

Тогда вычислим длины $LR_{l,c,p}$ раскатов, полученных на p -м проходе через клеть согласно (9)::

$$\begin{aligned} LR_{l,c,1} &= LS_{l,c} \times KT_{l,c,1}, \\ \forall p = 2; pI_{l,c} : \\ LR_{l,c,p} &= LR_{l,c,p-1} \times KT_{l,c,p} \end{aligned} \quad (9),$$

где: - $LS_{l,c}$ - длина кратного сляба, используемого при прокатке партии $SK_{l,c}^*$.

Таким образом, продолжительность $DT2_{l,c}$ прокатки на клети «трио» одного сляба партии $SK_{l,c}$ определим согласно (10):

$$DT2_{l,c} = \sum_{p=1}^{pI_{l,c}} LR_{l,c,p-1} / VT \quad (10),$$

где: - $VT = 18400 \text{ мм} / \text{мин}$ - скорость прокатки.

Продолжительность $DK2_{l,c}$ прокатки одного сляба на клети «кварто» определяется аналогично. В планово-производственном отделе для каждой прокатной партии в зависимости от марки стали и требований заказчика задаётся режим прокатки листов на клети «кварто»:

- стандартная прокатка в обычном температурном режиме,
- прокатка с получением листа с минимальной волнистостью и разнотолщинностью сечения,
- прокатка в температурном режиме с пониженной температурой конца прокатки.

Для каждого из режимов прокатки в производственном отделе определяется коэффициент $KQ_{l,c,q}$ обжатия листа на q -м пропуске через клеть «кварто» (отношение величины обжатия к толщине раската до обжатия, $q = 1; qI_{l,c}$ - номер пропуску через клеть) и количество $qI_{l,c}$ проходов, исходя из технологических особенностей прокатки и в

зависимости от марки стали и типоразмеров заказанного листа:

Коэффициент обжатия позволяет определить длину $LL_{l,c,q}$ прокатного листа на q -м проходе через клеть «кварто»:

$$\begin{aligned} LL_{l,c,1} &= LR_{l,c} \\ \forall q = 2; qI_{l,c} : \\ LL_{l,c,q} &= LL_{l,c,q-1} \times KQ_{l,c,q} \end{aligned} \quad (11)$$

и продолжительность q -го прохода прокатного листа через клеть:

$$\begin{aligned} \forall q = 1; qI_{l,c} : \\ DK_{l,c,q} &= LL_{l,c,q} / VK_q \end{aligned} \quad (12)$$

где скорость VK_q прокатки, которая различна на первых 45% проходов и остальных 55% проходов, определяется согласно (3.131):

$$VT_q = \begin{cases} 23560 \text{ нпу } q \leq E(0.45 \times qI_{l,c}) \\ 153140 \text{ нпу } q > E(0.45 \times qI_{l,c}) \end{cases} \quad (13)$$

Тогда продолжительность $DK2_{l,c}$ прокатки одного прокатного листа на клети «кварто» определим согласно (14):

$$\begin{aligned} DK2_{l,c} &= \sum_{q=1}^{qI_{l,c}} DK_{l,c,q} + THK_{l,c} + \\ &+ TZK \times (qI_{l,c} - 1) \end{aligned} \quad (14),$$

где: - $TZK = 0.33$ - пауза между двумя последовательными проходами раската через клеть «кварто»,

- $THK_{l,c}$ - время холостого пропуску раската через клеть без обжатия (выполняется, если общее число $qI_{l,c}$ проходов через клеть нечётное):

$$\begin{aligned} \text{нпу } qI_{l,c} \in \{3,5,7,9,11\} : \\ THK_{l,c} &= 0 \\ \text{нпу } qI_{l,c} \notin \{3,5,7,9,11\} : \\ THK_{l,c} &= LL_{l,c} / VL + TZK \end{aligned} \quad (15)$$

- $VL = 120000 \text{ мм} / \text{мин}$ - скорость движения листа во время холостого пропуску.

На основании вышеизложенного

определим продолжительность $DP_{2l,c}$ прокатки всей партии $SK_{l,c}$ кратных слябов на прокатных клетях:

$$DP_{2l,c} = (DT_{2l,c} + DK_{2l,c}) \times KS_{l,c} \quad (16)$$

После прокатки каждый лист партии $LP_{l,c}$ направляется на устройства охлаждения и правки.

3. Устройства предварительного охлаждения и порезки листового проката (блок3).

Каждый лист партии $LP_{l,c}$ проходит устройства предварительного охлаждения и правки в следующей последовательности. Вначале прокатный лист направляется по нескольким последовательным рольгангам к устройству ускоренного охлаждения (УУО). УУО предназначено для принудительного прерванного охлаждения горячего проката с нормированными механическими свойствами на растяжение и ударный изгиб – с целью получения требуемых механических свойств без снижения производительности стана. После УУО все прокатные листы по рольгангам направляются на ролик-правильные машины №1 и №2 (РПМ-1, РПМ-2), где пропускаются через каждую машину по одному разу с целью устранения дефектов прокатки на клети "кварто" (волнистость, разнотолщинность сечения проката). По окончании правки на РПМ-1, РПМ-2 все прокатные листы партии $LP_{l,c}$ перемещаются, охлаждаясь до температуры порезки либо по рольгангам малого потока, либо по рольгангам и холодильникам большого потока в зависимости от марки стали прокатного листа. Затем прокатные листы осматриваются на инспекторском столе №1 (ИС-1) с целью выявления дефектов прокатки и направляются на порезку. Для порезки используются дисковые ножницы, на которых обрезается боковая кромка листа и лобовые ножницы для торцевой обрезки и порезки прокатного листа на готовые листы заказанной длины. Затем порезанный прокат осматривается на инспекторском столе №2 и, в случае выявления дефектов, направляется на зачистку или дополнительную правку на РПМ-3. Схема движения прокатных листов по устройствам блока 3 представлена на рис.3.

Определим продолжительность $DZ_{l,c}$ прохождения через устройства блока 3 одного прокатного листа партии $LP_{l,c}$. Вначале

определим продолжительность $TH_{l,c}$ обработки прокатного листа на устройствах охлаждения (устройства малого или большого потока на рис.2) учитывая, что согласно технологическим особенностям, охлаждение выполняется на разных группах устройств для различных марок стали.

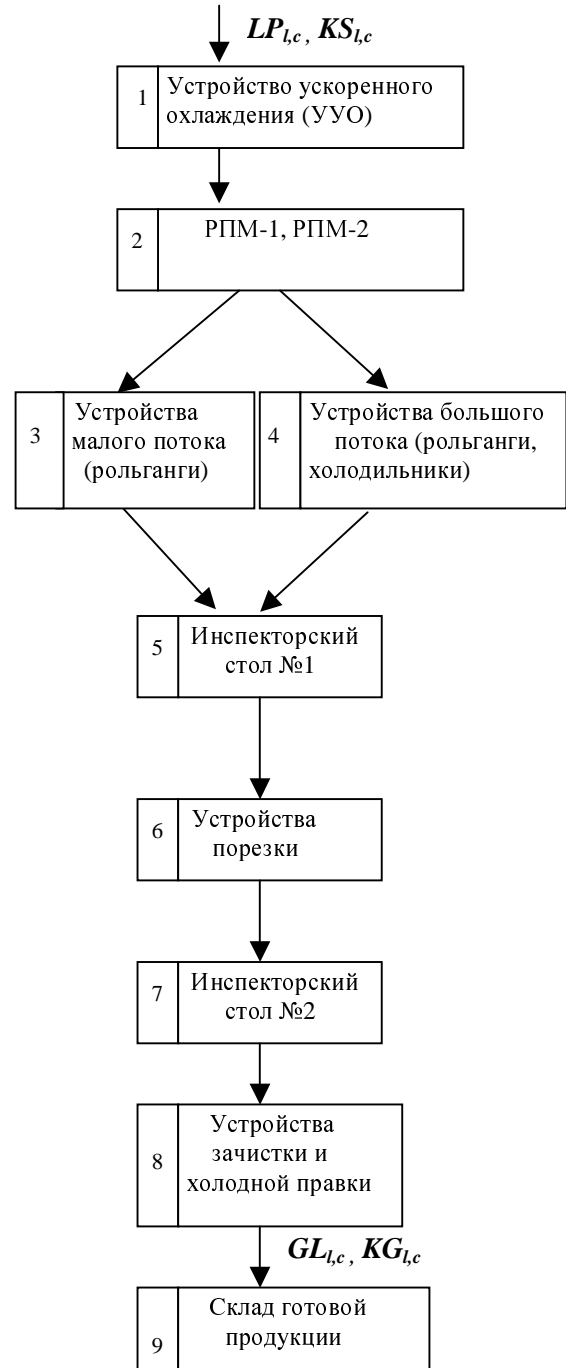


Рисунок 3 – Схема движения прокатных листов по устройствам предварительного охлаждения и порезки (блок3).

Для партий $LP_{l,c}$, номер $MST_{l,c}$ марки

стали которых удовлетворяет условию $PI(LP_{l,c})$ (16), охлаждение выполняют на устройствах малого потока (5-ти транспортных рольгангах, по которым лист перемещается к инспекторскому столу №1). Для остальных партий $LP_{l,c}$ охлаждение выполняют на устройствах большого потока (3-х транспортных рольгангах, по которым лист перемещается к холодильникам и 2-х транспортных рольгангах, по которым лист перемещается к инспекторскому столу №1). Номер $MST_{l,c}$ марки стали прокатного листа определяется в заказе. Зададим условие $PI(LP_{l,c})$ как предикат:

$$PI(LP_{l,c}) = MST_{l,c} \in \{21,22,23,24\} \quad (17)$$

Тогда продолжительность $TH_{l,c}$ обработки одного прокатного листа на устройствах охлаждения определим согласно (18) для партий, охлаждающихся на устройствах малого потока и согласно (19) для партий, охлаждающихся на устройствах большого потока:

$$\forall LP_{l,c} : PI(LP_{l,c}) = 1 \\ TH_{l,c} = 0.35(\text{мин.}) \quad (18)$$

$$\forall LP_{l,c} : PI(LP_{l,c}) = 0 \\ TH_{l,c} = T3 + THL_{l,c} \quad (19),$$

где $-T3 = 1.33$ (мин.)- продолжительность транспортировки одного листа по рольгангам устройств большого потока,

- продолжительность $THL_{l,c}$ охлаждения на холодильниках одного листа партии $LP_{l,c}$, зависящую от толщины $HL_{l,c}$ листа, определим согласно (20):

$$THL_{l,c} = \begin{cases} 40 \text{ мин} & \text{при } HL_{l,c} \in [16;20] \\ 30 \text{ мин} & \text{при } HL_{l,c} \in [14;15] \\ 20 \text{ мин} & \text{при } HL_{l,c} \in [11;13] \\ 15 \text{ мин} & \text{при } HL_{l,c} \in [5;10] \end{cases} \quad (20)$$

Затем, с учётом вышеизложенной последовательности прохождения устройств блока3, установим продолжительность $D3_{l,c}$ прохождения через устройства блока одного прокатного листа партии $LP_{l,c}$:

$$D3_{l,c} = TUO + TH_{l,c} + TI + TP_{l,c} + TP_{H,l,c} + TR_{l,c} + TZH_{l,c} + TTR \quad (21),$$

где: $-TUO = 0.9$ (мин.)- длительность охлаждения одного листа в УУО (определяется скоростью движения транспортного рольганга, перемещающего раскат внутри УУО, и не зависит от того, подвергается ли раскат охлаждению) и транспортировки его по рольгангам к РПМ-1,

$-TI = 1$ (мин.)- продолжительность осмотра одного листа на инспекторских столах №1 и №2,

$$-TP_{l,c} = 2 \times LL_{l,c} / 30600 -$$

продолжительность правки одного листа партии $LP_{l,c}$ на двух правильных машинах, где 30 600 мм/мин – скорость правки, $LL_{l,c}$ - длина листа, определённая по окончании прокатки листа на клети «кварто»,

$$-TR_{l,c} = LL_{l,c} / 2400 -$$

продолжительность обрезки боковой кромки одного прокатного листа партии $LP_{l,c}$ на дисковых ножницах, 2400 мм/мин – скорость обрезки,

$$-TZH_{l,c} = 5.24 / 4 = 1.31 \text{ (мин.)} -$$

средняя продолжительность зачистки дефектов одного листа партии $GL_{l,c}$ (с учётом, что в среднем 25% листов партии направляется на зачистку, 5.24 (мин.)-время зачистки одного листа),

$$-TPH_{l,c} - \text{средняя продолжительность}$$

правки одного готового листа партии $GL_{l,c}$ на РПМ-3; учитывая, что в среднем 1/12 часть листов партии правится в пакетах по 10 штук, проходя 4 раза через валки РПМ-3, и 1/12 часть листов партии правится по одному листу, также проходя через валки 4 раза, определим значение $TPH_{l,c}$:

$$TPH_{l,c} = 4 \times L_{l,c} / 12 \times 8280 + 4 \times L_{l,c} / 12 \times 10 \times 8280 = L_{l,c} / 22582 \quad (22),$$

где 8280мм/мин – скорость правки на РПМ-3, $L_{l,c}$ - длина готового листа партии $GL_{l,c}$

$-TTR = 3$ (мин.)- продолжительность транспортировки одного листа по рольгангам между устройствами блока3.

С учётом вышеизложенного, определим продолжительность $DP3_{l,c}$ обработки всей партии $LP_{l,c}$ на устройствах блока 3:

$$DP3_{l,c} = D3_{l,c} + KS_{l,c} \times \max(DT2_{l,c}, DK2_{l,c}) \quad (23),$$

где $\max(DT2_{l,c}, DK2_{l,c})$ - интервал между поступлением двух прокатных листов на вход блока 3, равный наибольшей из продолжительностей прокатки одного сляба на клети «трио» или клети «кварто».

По окончании обработки готовых прокатных листов партии $GL_{l,c}$ на устройствах предварительного охлаждения и правки, листы направляются на склад готовой продукции.

4.Складирование готовых листов и отгрузка потребителю (блок4).

Поступившие на склад готовой продукции партии $GL_{l,c}$ готовых листов остывают, исследуются в лабораториях на предмет соответствия требуемым свойствам и отгружаются потребителю.

Для определения продолжительности $DP4_{l,c}$ охлаждения, проведения анализа и погрузки всей партии $GL_{l,c}$ вначале установим продолжительность $TH4_{l,c}$ охлаждения, которая зависит от марки стали листа. Листы с маркой стали, удовлетворяющей условию (24), остывают в штабелях по 40тонн в течение 1 суток в холодное время года и 1.5 суток в тёплое время года, листы остальных марок стали остывают в течение 0.5 часа. Условие (24) зададим в виде предиката $P2(GL_{l,c})$:

$$P2(GL_{l,c}) = MST_{l,c} \in \{21,22,24\} \quad (24)$$

Тогда продолжительность $TH4_{l,c}$ охлаждения одного готового листа определим согласно (25):

$$\begin{aligned} \text{при } PT3(GL_{l,c}) = 0 : \\ TH4_{l,c} = 30 \\ \text{при } PT3(GL_{l,c}) = 1 \wedge VG_{l,c} = 0 : \\ TH4_{l,c} = 1440 \\ \text{при } PT3(GL_{l,c}) = 1 \wedge VG_{l,c} = 1 : \\ TH4_{l,c} = 2160 \end{aligned} \quad (25),$$

где значение величины $VG_{l,c}$ задаётся в планово-производственном отделе ($VG_{l,c} = 0$ - холодное время года, $VG_{l,c} = 1$ - тёплое время года).

Продолжительность $TA4_{l,c}$ проведения проб и анализа проката устанавливается в планово-производственном отделе, $TA4_{l,c} \in [120;300]$ (мин). Поэтому

продолжительность $D4_{l,c}$ обработки одного листа партии на устройствах блока4 для марок стали, удовлетворяющих условию $P2(GL_{l,c}) = 1$ определяется

продолжительностью остывания на складе, а для марок сталей, удовлетворяющих условию $P2(GL_{l,c}) = 0$ - временем проведения анализа

(причём загрузка вагонов листами выполняется в течение времени, пока идёт анализ). Согласно вышеизложенному, определим

продолжительность $D4_{l,c}$ охлаждения, анализа и погрузки одного готового листа партии $GL_{l,c}$:

$$\begin{aligned} \text{при } P2(GL_{l,c}) = 1 : \\ D4_{l,c} = 1 + TH4_{l,c} \\ \text{при } P2(GL_{l,c}) = 0 : \\ D4_{l,c} = TA4_{l,c} \end{aligned} \quad (26),$$

где 1мин. - продолжительность выгрузки первого листа партии на складе и погрузки последнего листа партии в вагон.

Тогда продолжительность $DP4_{l,c}$ охлаждения, анализа и погрузки всех листов партии $GL_{l,c}$ установим по (27):

$$\begin{aligned} \text{при } P2(GL_{l,c}) = 1 : \\ D4_{l,c} = 1 + KS_{l,c} \times \max(D3_{l,c}, D4_{l,c}) + TH4_{l,c} \\ \text{при } P2(GL_{l,c}) = 0 : \\ D4_{l,c} = TA4_{l,c} \end{aligned} \quad (27),$$

где $\max(D3_{l,c}, D4_{l,c})$ - интервал между поступлением двух разрезанных прокатных листов на склад (вход блока4).

Для решения задачи оперативного управления выполнением заказов необходимо также формализовать и установить время окончания обработки партии на каждой группе устройств, продолжительность прохождения по всему прокатному цеху каждой партии и продолжительность прохождения по всему прокатному цеху всех партии

Определим время окончания обработки каждой партии на каждой группе устройств.

Время $TK1_{l,c}$ окончания нагрева всех кратных слябов партии $SK_{l,c}$:

$$TK_{l,c} = TN_{l,c} + DP_{l,c} \quad (28),$$

где $TN_{l,c}$ - время начала нагрева в печах кратных слябов партии $SK_{l,c}$:

$$TN_{l,c} = TK_{l,c-1} + D_{l,c-1} \quad (29)$$

поскольку согласно технологическим особенностям нагрева, время $TN_{l,c}$ начала нагрева партии $SK_{l,c}$ равно времени $TK_{l,c-1}$ окончания нагрева предыдущей партии без учёта времени $D_{l,c-1}$ совместного нагрева в печи партии $SK_{l,c}$ и предыдущей партии $SK_{l,c-1}$.

Время $TK_{2,c}$ окончания прокатки на клетях всех прокатных листов партии $LP_{l,c}$:

$$TK_{2,c} = TK_{1,c} + D_{2,c} \quad (30)$$

Время $TK_{3,c}$ окончания обработки на устройствах блока3 прокатных листов партии $LP_{l,c}$:

$$TK_{3,c} = TK_{2,c} + D_{3,c} \quad (31)$$

Время $TK_{4,c}$ окончания обработки на устройствах блока3 прокатных листов партии $GL_{l,c}$:

$$TK_{4,c} = TK_{3,c} + D_{4,c} \quad (32)$$

На основании рассмотренного технологического процесса, определим продолжительность $TP_{l,c}$ прохождения по всему прокатному цеху каждой партии (от момента загрузки первого сляба партии в нагревательную печь до окончания погрузки партии в вагоны для отправки потребителю):

$$TP_{l,c} = DP_{l,c} + D_{2,c} + D_{3,c} \quad (33)$$

Тогда продолжительность T прохождения по всему прокатному цеху всех партии определим согласно (34):

$$T = \sum_{\substack{l,c \\ c \neq c_{l1}}} (DP_{l,c} - D_{l,c}) + \sum_{\substack{l=1;l1-1 \\ c=c_{l1}}} DP_{l,c} + TP_{l,c_{l1}} \quad (34)$$

Таким образом, рассмотрены и определены временные характеристики обработки металла на каждом из блоков устройств и в целом по прокатному цеху от момента задания кратных слябов в производство до отгрузки готовых прокатных листов потребителю.

Выводы. Технологические процессы конвейерного типа с ожиданием являются достаточно громоздкими процессами для формализации. Предлагаемая методика определения временных характеристик листопрокатного процесса позволяет формально представить логико-формальные связи между переменными процесса в виде зависимостей. Составлена формальная модель, позволяющая решать задачи планирования и оперативного управления как составляющей части информационных технологий, определяющей структуру базы знаний. На практике модель позволяет производственным службам получать многовариантные расчёты производственных заданий.

Литература

1. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. - 911с.
2. Таха, Хэмди А. Введение в исследование операций.- М.: Вильямс, 2007. - 912с.
3. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний.- М.: Наука, 1975. - 360с.
4. Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж. Построение и анализ вычислительных алгоритмов.- М.: Мир, 1979. - 536с.
5. Иванов Б.Н. Дискретная математика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 408с.
6. Скобелев В.Г. Локальные алгоритмы на графах. – Донецк: ИПММ НАН Украины, 2003. – 217с.
7. Оре О. Теория графов.- М.: Наука, 1968. – 352с.
8. Скобелев В.Г. Анализ дискретных систем. – Донецк: ИПММ НАН Украины, 2002. – 172с.
9. Клименко В.М. Технология прокатного производства. – К.: Высшая школа, 1989. - 311с.
10. Шаталов Р.Л., Койнов Т.А., Литвинова Н.Н. Автоматизация технологических процессов прокатки и термообработки металлов и сплавов.- М.: ЗАО «Металлургиздат», 2010. – 368 с.

Поступила в редакцию 15.03.2010