

Математическая модель объектов производства и процесса литья

Разработано:	Институт Автоматизации проектирования РАН
Версия документа:	0.3
Дата создания:	22.12.2013

Москва – 2013

КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЙ ДОКУМЕНТА

Имя изменившего	Дата изменения	Версия	Описание изменения
Нелюбин А.П.	06.12.2013	0.1	Первоначальная версия документа. Описаны входные параметры объектов производства, известные на начало планируемого периода.
Нелюбин А.П.	10.12.2013	0.2	Входные параметры объектов производства скорректированы по замечаниям. Добавлены искомые параметры объектов производства, соответствующие планируемому расписанию их работы. Добавлены вычисления и проверки. Добавлена первая версия модели процесса литья.
Нелюбин А.П.	22.12.2013	0.3	Входные параметры объектов производства скорректированы по замечаниям. Добавлена функция штрафа за переплавку. В модели процесса литья: - добавлено описание постановок задач - добавлены блок-схемы процесса литья для части схем агрегатов

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА.....	4
1.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ.....	4
1.2. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ.....	4
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ.....	9
2.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ.....	9
2.2. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ.....	9
2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ «ПОЛНОЙ» ХОДКИ.....	12
2.4. ЗАДАЧА О «КУКУШКАХ».....	13
2.5. БЛОК-СХЕМЫ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ НА АГРЕГАТАХ.....	14

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА

1.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Описываются параметры объектов производства, известные на начало планируемого периода, искомые, а также взаимосвязь этих параметров. Параметры завода, относящиеся к транспортировке, вынесены в модель транспортировки.

1.2. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Объект: завод *plant*

Известные параметры завода:

- $\langle \text{list} \rangle \text{CastHouses}(\text{plant})$ – список литейных отделений завода
- $\langle \text{map} \rangle \text{SGP}(\text{plant}, \text{prod}, \text{length})$ – склад готовой продукции при заводе ($\langle \text{map} \rangle$ – соответствие: кортеж $\langle \text{prod}, \text{length} \rangle \rightarrow$ имеющийся объем в тоннах)
- $\text{PremA7}(\text{plant})$ – премия А7 на период планирования для данного завода
- $\langle \text{map} \rangle \text{Cost}(\text{plant}, \text{mark}, \text{form})$ – себестоимость литейного передела ($\langle \text{map} \rangle$ – соответствие: кортеж $\langle \text{mark}, \text{form} \rangle \rightarrow$ себестоимость в руб.)
- $\text{AddCost}(\text{plant})$ – дополнительные затраты на переплавку
- $\text{MeltingLoss}(\text{plant})$ – угар при переплавке

Объект: литейное отделение *castHouse*

Известные параметры ЛО:

- $\text{Plant}(\text{castHouse})$ – завод
- $\langle \text{list} \rangle \text{CUnits}(\text{castHouse})$ – список литейных агрегатов в ЛО
- $\langle \text{list} \rangle \text{Moulds}(\text{castHouse})$ – список оснасток, имеющихся в ЛО
- $\langle \text{list} \rangle \text{Filters}(\text{castHouse})$ – список фильтров, имеющихся в ЛО
- $\langle \text{list} \rangle \text{Heaters}(\text{castHouse})$ – список разогревателей фильтров
- $\text{Weight}_{\text{blank}}^{\text{max}}(\text{castHouse})$ – грузоподъемность крана (~18т)
- электролизный цех:
 - $\langle \text{list} \rangle \text{Els}(\text{castHouse})$ – список электролизеров
 - $V_{\text{ladle}}^{\text{max}}(\text{castHouse})$ – объем полного ковша (т)

Объект: литейный агрегат *k*

Известные параметры агрегата:

- $\text{CastHouse}(k)$ – литейное отделение
- $\langle \text{list} \rangle \text{Filters}(k)$ – список фильтров, подходящих агрегату
- $\langle \text{list} \rangle \text{Marks}(k)$ – список марок, которые можно отливать на агрегате
- $\text{Structure}(k)$ – структура агрегата. Литейные машины используются при производстве плоских, цилиндрических слитков и Т-образной чушки. При производстве мелкой чушки вместо литейной машины используется конвейер, состоящий из металлических форм (изложниц) для отливки чушки, которые находятся на движущейся ленте. Для производства катанки используются прокатные станы.
 - $n\text{Collect}(k)$ – число миксеров копильников (1, 2)
 - $\langle \text{list} \rangle \text{Collect}(k)$ – список копильников
 - $n\text{Distr}(k)$ – число миксеров раздаток (0, 1)
 - $\langle \text{list} \rangle \text{Distr}(k)$ – список раздаток

- $nFilter(k)$ – число фильтров тонкой очистки (0, 1)
- $Filter_0(k)$ – фильтр, смонтированный на агрегате в начале планируемого периода
- $nCM(k)$ – число литейных машин (1, 2, 3)
- $\langle list \rangle CM(k)$ – список литейных машин
- $nHomCut(k)$ – число линий гомогенизации и резки (0, 1, 2) (BILLETS)
- $\langle list \rangle HomCut(k)$ – список линий гомогенизации и резки
- $T_0(k)$ – время начала доступности агрегата в планируемом периоде
- $Prod_0(k)$ – продукция, выполняемая непосредственно перед планируемым периодом
- $T_{change}(k, mark_1, mark_2)$ – время промывки миксера при переходе между марками (ч)
- $V_{change}(k, mark_1, mark_2)$ – объем промывки миксера при переходе между марками (т)
- $I_{clean}(k, mark_1, mark_2)$ – индикатор необходимости чистки миксера при переходе между марками (true/false)
- $CleanCost(k)$ – стоимость чистки миксера (руб/т)
- $\langle map \rangle FilterCons(k, mark)$ – расход фильтра при отливке продукта с маркой $mark$ ($\langle map \rangle$ – соответствие: $mark \rightarrow$ расход в ресурс/тонна)
- $\langle map \rangle El\%(k, element)$ – возможности агрегата по уменьшению примеси $element$ в сплаве ($\langle map \rangle$ – соответствие: $element \rightarrow$ значение в %)
- $T_{ladle}^{max}(k)$ – время заливки полного ковша в миксер (ч)

Вычисляемые параметры (на основе известных) агрегата:

- $\langle list \rangle Forms(k)$ – список форм, которые можно отливать на агрегате:

$$Forms(k) = \bigcup_{cm \in CM(k)} \left(\bigcup_{mould \in Moulds(cm)} Form(mould) \right)$$

- $\langle list \rangle Profiles(k)$ – список сечений, которые можно отливать на агрегате:

$$Profiles(k) = \bigcup_{cm \in CM(k)} \left(\bigcup_{mould \in Moulds(cm)} Profile(mould) \right)$$

Искомые параметры агрегата:

- $\langle list \rangle OrderParts(k)$ – упорядоченный список частей заказов, выполняемых на агрегате.

Предполагается, что части заказов выполняются на агрегате непрерывно. Время старта и финиша исполнения каждой части заказа относится к искомым параметрам соответствующей части. Там же указано число ходок в каждую смену.

Ограничения модели, используемые на этапе Presolve:

- Проверка возможности выполнения продукта $prod$ на агрегате k :

1. $Form(prod) \in Forms(k)$
2. $Mark(prod) \in Marks(k)$
3. $Profile(prod) \in Profiles(k)$
4. $Filtration(prod) = (nFilters(k) > 0)$
5. $Homogenization(prod) = (nHomCut(k) > 0)$

Объект: миксер *mixer*

Известные параметры миксера:

- $CU(mixer)$ – литейный агрегат
- $V_{mixer}(mixer)$ – максимальный объем миксера (т) ($\sim 15\text{--}100$ т)
- $V_{rest}(mixer)$ – минимальный объем «болота» (т)
- $T_{prepare}^{const}(mixer, mark)$ – постоянное время подготовки миксера (ч) (<map> – соответствие:

$mark \rightarrow$ время)

- $R(mixer)$ – общее число ремонтов миксера в месяц
- <list> $T_{repair}^s(mixer)$ и $T_{repair}^f(mixer)$ – время начала и окончания каждого ремонта
- $nCleans(mixer)$ – количество чисток в месяц
- $T_{clean}(mixer)$ – время на чистку миксера
- <list> $CleanShifts(mixer)$ – список смен чистки миксера

Искомые параметры миксера:

- <list> $T_{clean}^s(mixer)$ – время начала каждой чистки

Вычисляемые параметры (на основе искомых) миксера:

- время окончания каждой чистки $c = 1, \dots, nClean(mixer)$:

$$T_{clean}^f(mixer, c) = T_{clean}^s(mixer, c) + T_{clean}(mixer)$$

Ограничения (взаимосвязь параметров) миксера:

$$\forall c = 1, \dots, nClean(mixer): T_{clean}^s(mixer, c), T_{clean}^f(mixer, c) \in CleanShifts(mixer, c)$$

Объект: миксер копильник *collect*

Наследует параметры *mixer*

Объект: миксер раздатка *distr*

Наследует параметры *mixer*

Дополнительные известные параметры раздатки:

- $v_{pour}(distr)$ – скорость перелива расплава из копильника в раздатку (т/ч)

Объект: литейная машина *cm* (casting machine)

Известные параметры литейной машины:

- $CU(cm)$ – литейный агрегат
- $T_{prepare}^{const}(cm, mark)$ – постоянное время подготовки литейной машины (ч) (<map> – соответствие: $mark \rightarrow$ время)

- $T_{cast}^{const}(cm)$ – постоянное время литья (ч)
- <list> $Moulds(cm)$ – список оснасток, подходящих для литейной машины
- $Mould_0(cm)$ – оснастка, установленная в начале планируемого периода
- $T_{remould}(cm)$ – время переоснастки (ч) (\sim несколько часов)
- $T_{filterInstall}(cm)$ – время установки фильтра (ч) (~ 6 ч)
- $L_{blank}^{max}(cm)$ – максимальная длина заготовки (мм)
- $R(cm)$ – общее число ремонтов литейной машины в месяц
- <list> $T_{repair}^s(cm)$ и $T_{repair}^f(cm)$ – время начала и окончания каждого ремонта
- <map> $nPeriodic(cm, operation)$ – количество периодических операций *operation* в месяц
- <map> $T_{periodic}(cm, operation)$ – время на периодическую операцию *operation*
- <map><list> $PeriodicShifts(cm, operation)$ – список смен периодических операций

Искомые параметры литейной машины:

- $\langle \text{map} \rangle \langle \text{list} \rangle T_{\text{periodic}}^s(cm, operation)$ – время начала каждой периодической операции

Вычисляемые параметры (на основе искомых) литейной машины:

- время окончания каждой периодической операции $c = 1, \dots, nPeriodic(cm, operation)$:

$$T_{\text{periodic}}^f(cm, operation, c) = T_{\text{periodic}}^s(cm, operation, c) + T_{\text{periodic}}(cm, operation)$$

Ограничения (взаимосвязь параметров) литейной машины:

$$\forall c = 1, \dots, nPeriodic(cm, operation):$$

$$T_{\text{periodic}}^s(cm, operation, c), T_{\text{periodic}}^f(cm, operation, c) \in PeriodicShifts(cm, operation, c)$$

Объект: линия гомогенизации и резки *hc***Известные параметры** линии гомогенизации и резки:

- $\langle \text{list} \rangle CU(hc)$ – список литейных агрегатов (может быть 2 ЛА)
- $\langle \text{map} \rangle T_{\text{load}}(hc, diameter)$ – время загрузки слитка в печь гомогенизации (ч)
- $\langle \text{map} \rangle v_{\text{cut}}(hc, diameter, length)$ – скорость резки (резов в ч)
- $R(hc)$ – общее число ремонтов литейной машины в месяц
- $\langle \text{list} \rangle TS_r(hc)$ и $TF_r(hc)$ – время начала и окончания ремонта $r = 1, \dots, R(hc)$
- $L_{\text{blank}}^{\min}(hc)$ – минимальная длина заготовки (мм)
- $L_{\text{blank}}^{\max}(hc)$ – максимальная длина заготовки (мм)

Объект: оснастка *mould***Известные параметры** оснастки:

- $CastHouse(mould)$ – литейное отделение
- $CM_0(mould)$ – литейная машина, на которой установлена оснастка в начале планируемого периода (0, если свободна)
- $Form(mould)$ – форма
- $Profile(mould)$ – сечение слитков
 - $Width(mould)$ – ширина (мм) (для SLABS и T-BARS)
 - $Height(mould)$ – высота (мм) (для SLABS и T-BARS)
 - $Diameter(mould)$ – диаметр (мм) (для BILLETS)
- $Resource(mould)$ – текущий ресурс оснастки (т)
- $ResourceMax(mould)$ – максимальный ресурс оснастки (т)
- $T_{\text{prepare}}(mould)$ – время подготовки оснастки к работе
- $\langle \text{map} \rangle v_{\text{cast}}(mould, mark)$ – скорость литья (мм/ч)
- $\langle \text{list} \rangle nBlanks(mould)$ – количество одновременно отливаемых заготовок (список чисел)

Объект: фильтр *filter***Известные параметры** фильтра:

- $CastHouse(filter)$ – литейное отделение
- $State_0(filter)$ – состояние готовности фильтра в начале планируемого периода (занят ЛА – engaged, готовится – preparing, готов к разогреву – prepared, разогревается – heating, разогрет – ready, устанавливается на ЛА – installing)
 - $CU_0(filter)$ – литейный агрегат, на котором установлен фильтр в начале планируемого периода (если $State_0 = engaged$)
 - $Heater_0(filter)$ – Разогреватель, на котором установлен фильтр в начале планируемого периода (если $State_0 = heating$)
 - $T_0(filter)$ – время готовности фильтра к установке в начале планируемого периода

- $Resource(filter)$ – текущий ресурс фильтра (%)
- $ResourceOver(filter)$ – допустимый перерасход ресурса фильтра (%) (~2%)
- $ChMark(filter, mark_1, mark_2)$ – допустимые переходы от марки $mark_1$ к марке $mark_2$ без промывки фильтра (*true/false*)
- $T_{change}(filter, mark_1, mark_2)$ – время промывки фильтра при переходе между марками (ч)
- $T_{prepare}(filter)$ – время подготовки фильтра к работе (ч) (~ 7-8 суток)
- $T_{heat}(filter)$ – время разогрева фильтра (ч) (~ 3 суток)

Объект: разогреватель фильтров *heater*

Известные параметры разогревателя:

- $CastHouse(heater)$ – литейное отделение
- $State_0(heater)$ – состояние готовности разогревателя в начале планируемого периода (занят – engaged, готов – ready)
- $T_0(heater)$ – время готовности разогревателя в начале планируемого периода

Объект: план на выливку электролизера *electr* (в отдельную смену)

Известные параметры электролизера:

- $CastHouse(electr)$ – литейное отделение
- $Day(electr)$ – день
- $Shift(electr)$ – смена
- $V(electr)$ – план по объему (т)
- $\langle map \rangle El(electr, element)$ – план по содержанию химического элемента *element* в электролизере ($\langle map \rangle$ – соответствие: $element \rightarrow$ содержание в %)

Функции штрафа:

1. Стоимость переплавки объема V :

$$MeltCost(V) = V * \left(AddCost(plant) + MeltingLoss(plant) * (LME + Prem(i)) \right)$$

- 1.1. При расчете стоимости перехода между марками в качестве V используется объем промывки миксера $V_{change}(k, mark_1, mark_2)$, зависящий от агрегата k .
- 1.2. При расчете потерь из-за обрезки в качестве V используется объем обрезки.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ

2.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Моделируется процесс литья конкретного заказа на конкретном агрегате. Эти данные являются исходными для модели. Основным объектом модели является ходка (плавка), параметры которой зависят как от агрегата, так и от заказа.

На разных этапах работы алгоритма оптимизации расписания могут потребоваться различные постановки задач, связанные с моделируемым процессом литья:

- Определить структуру «полной» (оптимальной) ходки при выполнении данного заказа на данном агрегате. Под *структурой* ходки понимается число отливаемых заготовок и число слитков в каждой заготовке. По этой информации можно оценить объем и время выполнения ходки, а также объем обрезки ходки.

- Задача о «кукушках». Для двух заказов с подходящими продуктами определить структуру общей «полной» ходки (может отличаться от «полных» ходок для исходных заказов), которая дополнительно включают количественное соотношение и взаимное расположение слитков разных заказов. Определить общую длину обрезки в такой ходке.

- Для заданного объема части заказа в виде числа слитков определить минимальное число ходок.

- Для заданного объема заказа (в ходках или в слитках) определить время выполнения на данном агрегате.

- Для заданного периода времени (точно в часах или приближенно в сменах) определить объем заказа, который можно выполнить на агрегате (число ходок, слитков).

- Определить число ходок и время выполнения заказа на агрегате до одного из событий прерывания (закончился ресурс фильтра или оснастки).

Поскольку процесс литья зависит от доступности оборудования (миксеры, литейные машины, оснастки, фильтры) и от характеристик этого оборудования, то при расчете объема и времени выполнения заказов следует моделировать процесс литья с самого начала планируемого периода и параллельно на всех агрегатах литейного отделения. Поэтому будем считать, что для рассматриваемых в процессе моделирования ходок известны день, смена и время начала выполнения, текущее оборудование на литейном агрегате, а также вся информация о предыдущих ходках.

2.2. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Опишем параметры математических объектов и зависимости между ними. Какие параметры являются известными, а какие искомыми, зависит от постановки задачи.

Объект: часть m заказа i , $m = 1, \dots, M(i)$

Параметры части заказа:

- $V(i, m)$ – объем части заказа (τ)

- $k(i, m)$ – ЛА, на котором выполняется часть заказа

- $T^s(i, m)$ – время начала исполнения части заказа (дата, номер смены, время)

- $T^f(i, m)$ – время окончания исполнения части заказа (дата, номер смены, время)

- $nCasts(i, m)$ – число ходок части заказа

- $\langle map \rangle \langle list \rangle Casts(i, m, day, shift)$ – список ходок части заказа, исполняемых в день day в смену $shift$ ($\langle map \rangle$ – соответствие: кортеж $\langle day, shift \rangle \rightarrow$ список ходок)

Объект: ходка (плавка) *cast*

Параметры ходки:

- *Order(cast)* – заказ, производимый в ходке
- *OrderPart(cast)* – часть заказа, производимая в ходке
- *Prod(cast)* – продукт, производимый в ходке. *Mark(cast) = Mark(Prod(cast))* – марка
- *k(cast)* – ЛА, на котором выполняется ходка
- *C(cast)* – коллектор ходки
- *D(cast)* – раздатка ходки (если есть на *k(cast)*)
- *CM(cast)* – литейная машина ходки
- *HomCut(cast)* – линия гомогенизации и резки ходки (если есть)
- *Mould(cast)* – текущая оснастка на *CM(cast)*
- *Filter(cast)* – текущий фильтр на *k(cast)* (если есть)
- *PrevCast(cast)* – предыдущая ходка
- *Day(cast)* – день
- *Shift(cast)* – смена
- структура ходки:
 - *Blanks(cast)* – количество занятых кристаллизаторов на литейной машине
 - *Ingots(cast)* – количество слитков в одной заготовке
- *T^S(cast)* – время начала ходки

Вычисляемые параметры ходки:

- *L_{blank}^{max}(cast)* – максимальная длина заготовки ходки

$$L_{blank}^{max}(cast) = \min \left\{ \begin{array}{l} L_{blank}^{max}(CM(cast)), \\ L_{blank}^{max}(HomCut(cast)), \\ \frac{Weight_{blank}^{max}(CastHouse(k(cast))) * Length(Prod(cast))}{Weight(Prod(cast))} \end{array} \right\}$$

- *L_{blank}(cast)* – длина заготовки (мм):

$$L_{blank}(cast) = Ingots(cast) * Length(Prod(cast)) + Clipping(Prod(cast))$$

- *V(cast)* – объем ходки для плоских слитков SLABS (т):

$$V(cast) = Blanks(cast) * L_{blank}(cast) * Height(Prod(cast)) * Width(Prod(cast)) * \rho$$

- *V(cast)* – объем ходки для Т-образной чушки T-BARS (т):

$$V(cast) = Blanks(cast) * L_{blank}(cast) * \\ * LinearWeight(Height(Prod(cast)), Width(Prod(cast)))$$

- *V(cast)* – объем ходки для цилиндрических слитков BILLETS (т):

$$V(cast) = Blanks(cast) * L_{blank}(cast) * \frac{\pi}{4} * Diameter^2(Prod(cast)) * \rho$$

- *V_{cob}(cast)* – требуемый расход сырца ходки (т):

$$V_{cob}(cast) = V(cast) * Cob(Prod(cast))$$

- $T(cast)$ – время выполнения ходки. Вычисляется путем моделирования процесса литья
- $T^f(cast)$ – время окончания ходки:

$$T^f(cast) = T^s(cast) + T(cast)$$

- $T_{prepare}^C(cast)$ – время подготовки сплава в копильнике:

$$T_{prepare}^C(cast) = T_{prepare}^{const}(C(cast), mark(cast)) + \frac{T_{ladle}^{max}(k(cast)) * V_{cob}(cast)}{V_{ladle}^{max}(CastHouse(k(cast)))}$$

- $T_{pour}(cast)$ – время перелива сплава из копильника в раздатку (если есть):

$$T_{pour}(cast) = \frac{V_{cob}(cast)}{v_{pour}(D(cast))}$$

- $T_{prepare}^D(cast)$ – время подготовки сплава в раздатке (если есть):

$$T_{prepare}^D(cast) = T_{prepare}^{const}(D(cast), Mark(cast))$$

- $T_{prepare}^{CM}(cast)$ – время подготовки литейной машины:

$$T_{prepare}^{CM}(cast) = T_{prepare}^{const}(CM(cast), Mark(cast))$$

- $T_{cast}(cast)$ – время литья:

$$T_{cast}(cast) = T_{cast}^{const}(CM(cast)) + \frac{L_{blank}(cast)}{v_{cast}(Mould(cast), Mark(cast))}$$

Ограничения (взаимосвязь параметров) ходки:

1. Параметр ходки $Blanks(cast)$ принимает значения из множества, задаваемого оснасткой:

$$Blanks(cast) \in nBlanks(Mould(cast))$$

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ «ПОЛНОЙ» ХОДКИ

Структура ходки в виде чисел $Blanks(cast)$ и $Ingots(cast)$ считается оптимальной, если эта ходка дает наибольшее возможное число слитков, и выполняется при этом за наименьшее время. Ходку с такой структурой назовем «полной». Для оптимизации расписания выгодно осуществлять только «полные» ходки.

Оптимальная структура ходки определяется путем решения оптимизационной задачи:

$$\begin{array}{l}
 \text{maximize} \quad Blanks(cast) * Ingots(cast) \rightarrow \max \\
 \text{s.t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} L_{blank}(cast) \leq L_{blank}^{max}(cast) \\ V_{cob}(cast) \leq V_{mixer}(Collect(cast)) \\ Blanks(cast) \in nBlanks(Mould(cast)) \end{array} \right. ,
 \end{array}$$

где величины $L_{blank}(cast)$, $L_{blank}^{max}(cast)$ и $V_{cob}(cast)$ рассчитываются по приведенным в пункте 2.2 формулам.

Возможны случаи, когда получается более одного решения. Например:

$Blanks(cast) = 4$ $Ingots(cast) = 3$ общее число слитков = 12

$Blanks(cast) = 3$ $Ingots(cast) = 4$ общее число слитков = 12

В первом случае меньше время литья, но больше общая обрезь. Во втором случае наоборот. По умолчанию решили считать вторую структуру лучше. Т.е. если получено более одного решения этой оптимизационной задачи, то среди них выбирается то, в котором минимально $Blanks(cast)$.

Последнее ограничение зависит от конкретной оснастки. В ходе работы алгоритма оптимизации расписания может потребоваться оценить структуру «полной» ходки без моделирования процесса литья. Например, на этапе Presolve. Тогда неизвестно, какая оснастка установлена. В этом случае можно не учитывать последнее ограничение вовсе, либо рассмотреть множество всех оснасток, подходящих для литейного агрегата:

$$nBlanks(k) = \bigcup_{cm \in CM(k)} \left(\bigcup_{mould \in Moulds(cm)} nBlanks(mould) \right)$$

Что делать с остатками в виде неполных ходок

Нужно точно попасть в требуемое число слитков в заказе. Перепроизведенные слитки в целевой функции сейчас считаем как обрезь.

Можно:

1. Перераспределять слитки между последними ходками (между полной и неполной)
2. Округлять объем заказа за счет имеющегося СГП
3. Объединять разные заказы в одной ходке («кукушки»)

Округление объема заказа за счет СГП

Для хранимой продукции на СГП указывается $Prod$, а также $Profile$. Если эта продукция подходит заказу, то можно взять с СГП столько слитков, чтобы произвести осталось целое число ходок данного заказа.

2.4. ЗАДАЧА О «КУКУШКАХ»

Проверка возможности объединения двух заказов в одной ходке:

1. Заказы с $Status(Prod(i)) = \text{«опытный»}$ не объединяются ни с чем.
2. Совпадение сечений у слитков: $Profile(i_1) = Profile(i_2)$
3. Принципиальная возможность объединения продуктов для литья в одной ходке: $Compatible(i_1, i_2) = true$

Структура объединенной ходки

СП:

Слитки из разных заказов можно объединять в одной заготовке произвольно.

СЦ:

В одной заготовке можно объединить 1 длинный слиток и 1-2 коротких.

Но в одной заготовке не может быть двух разных «коротышей» (с разной длиной).

Длина объединенной заготовки

$$L_{blank}(cast) = Ingots_1 * Length(i_1) + Ingots_2 * Length(i_2) + Clipping(i_1, i_2)$$

$Clipping(i_1, i_2)$ можно считать как среднюю или минимальную обрезь данных двух заказов.

Длина всех заготовок в ходке должна быть одинаковой и равняться максимальной из них.

В результате можно посчитать суммарную обрезь ходки, которая зависит от того, как мы расположили разные слитки в заготовках. Очевидно, что выгодно сделать все заготовки в ходке одинаковыми по составу слитков, так как при этом отсутствует лишняя обрезь.

Выбор заказов для объединения

Эффективность объединения заказов предлагается оценивать по тому, удалось ли сократить общее число ходок, а также по суммарной обрезе.

Можно в самом начале построения расписания посмотреть, как соотносятся остатки ходок разных заказов. Например, целесообразно объединить заказы, у которых в остатках 0,4 и 0,6 полных ходок.

Возможно, получится добиться оптимизации существующего расписания за счет более интенсивного объединения заказов. Например, в нескольких ходках подряд лить заготовки, состоящие из 1 длинного СЦ и 1-2 коротких СЦ. Литейщики называют это «подрезью».

2.5. БЛОК-СХЕМЫ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ НА АГРЕГАТАХ

Вычисление времени выполнения определенных объемов заказов или, наоборот, вычисление объема заказа, который можно выполнить за определенное время, предлагается осуществлять путем моделирования всего процесса литья на отдельных агрегатах и на всем литейном отделении.

Ниже приведены блок-схемы процесса литья ходок на агрегатах с различной структурой. Неделимые операции на отдельных частях агрегата обозначены овалами, в которых указано название операции и части агрегата, задействованные в этой операции. Заметим, что одна и та же часть агрегата не может быть одновременно задействована в двух разных операциях. Время выполнения каждой операции известно, либо легко может быть вычислено по приведенным выше формулам.

Стрелки на блок-схемах устанавливают строгую последовательность выполнения операций. В самом начале процесса выполняются стрелки, исходящие из состояния «*Start Process*». Эти стрелки активируют операции, в которые они входят. Операция не будет начата, пока её не активирует достаточное число входящих стрелок. Это *число активации* указано под операцией. В скобках за этим числом указано оставшееся число активаций в самом начале процесса. Если под операцией не указаны эти числа, то они по умолчанию полагаются равными «1(1)». После завершения операции выполняются стрелки, исходящие из этой операции. И так далее.

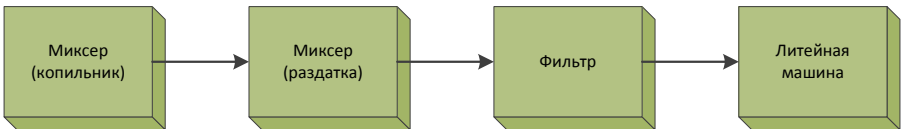
Ромбами обозначены операции автоматического принятия решений. Время этих операций равно 0. Решение принимается при активации одной входящей стрелкой. При этом выполняется одна из двух исходящих стрелок, в зависимости от принятого решения.

Каждая ходка начинается с операции приготовления одного из копильников *Prepare(C)*. И заканчивается после операции литья в состоянии «*End Cast*».

Промывка по сути является микро-ходкой, занимающей как правило, каждый из элементов ЛА. Необходимость промывки миксера определяется по каждому миксеру-копильнику в отдельности – в зависимости от предыдущего и последующего продукта по данному миксеру (промывка раздатки происходит вместе с промывкой копильника). Необходимость промывки фильтра проверяется по литейной машине – на основании предыдущего и последующего продуктов на данной литейной машине.

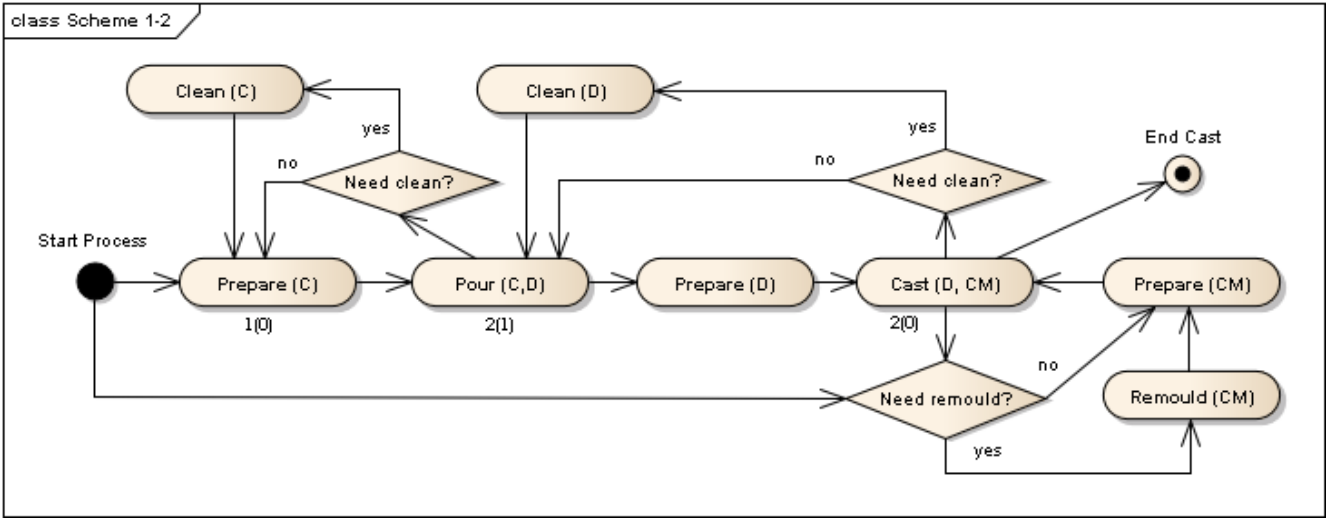
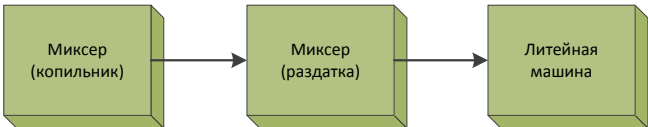
Scheme 1

1 копильник, 1 раздатка, 1 фильтр тонкой очистки, 1 литейная машина (4 ЛА 3 ЛО КРАЗ АДВ)



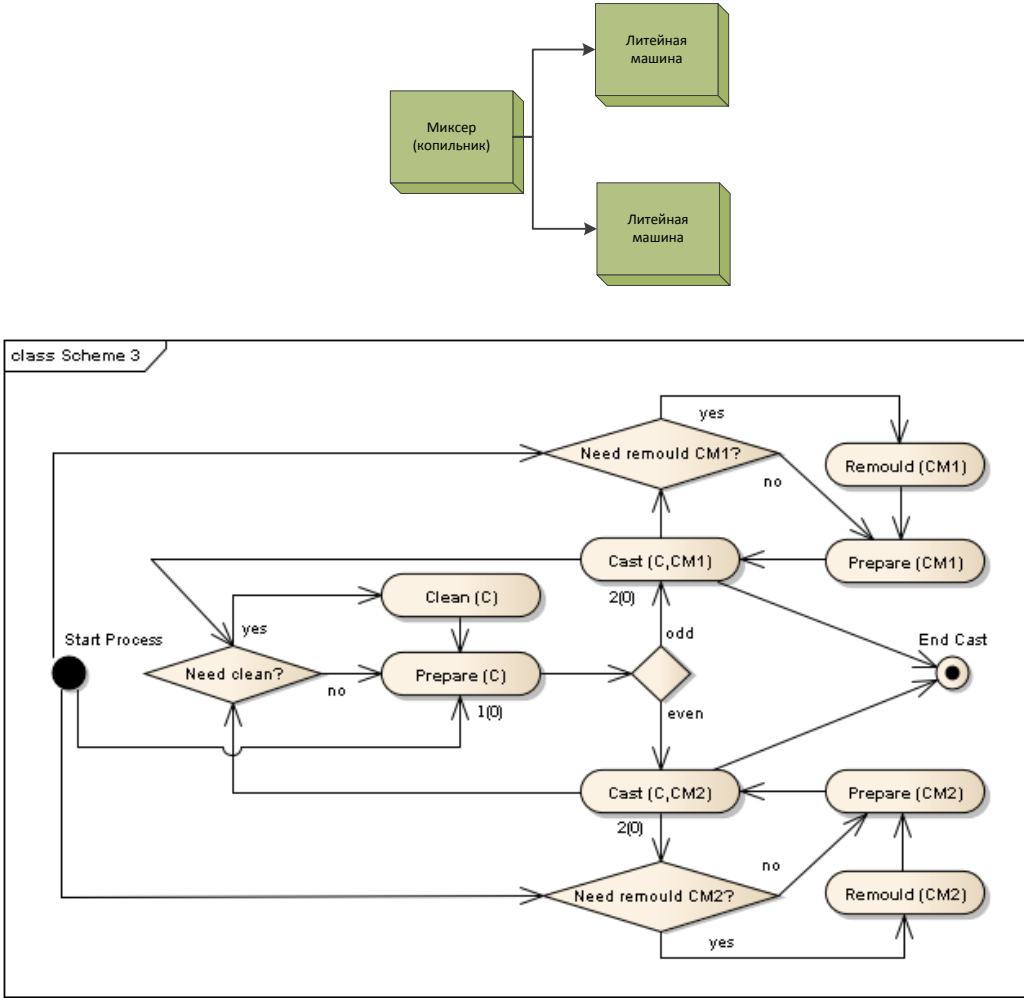
Scheme 2

1 копильник, 1 раздатка, 1 литейная машина (количество 4 литейных агрегата на АДВ)



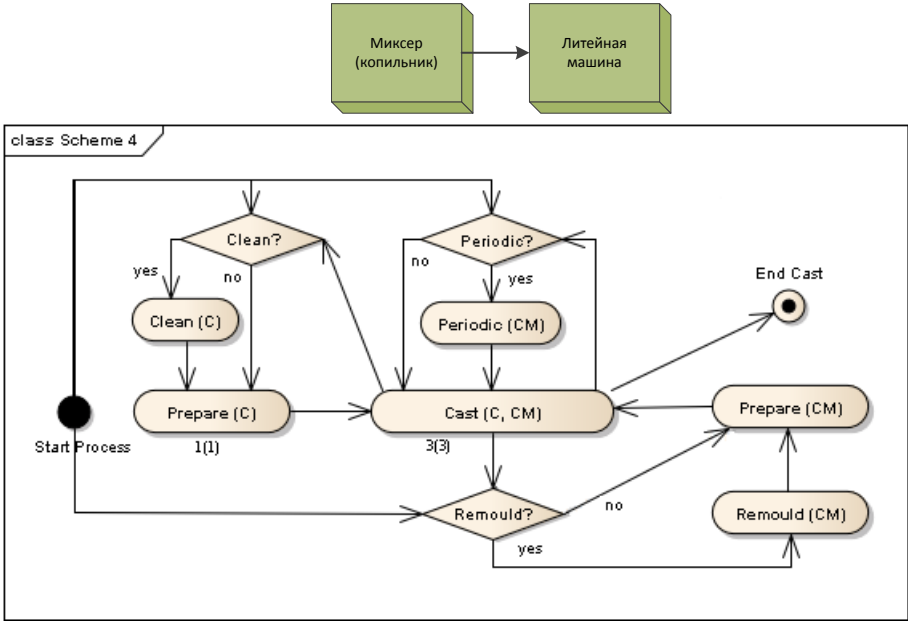
Scheme 3

1 копильник, 2 литейных машины (количество 7 ЛА на АДВ)



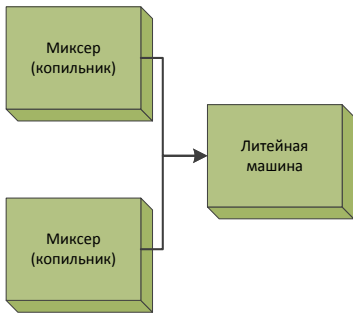
Scheme 4

1 копильник, 1 литейная машина (количество 3 ЛА на АДВ)



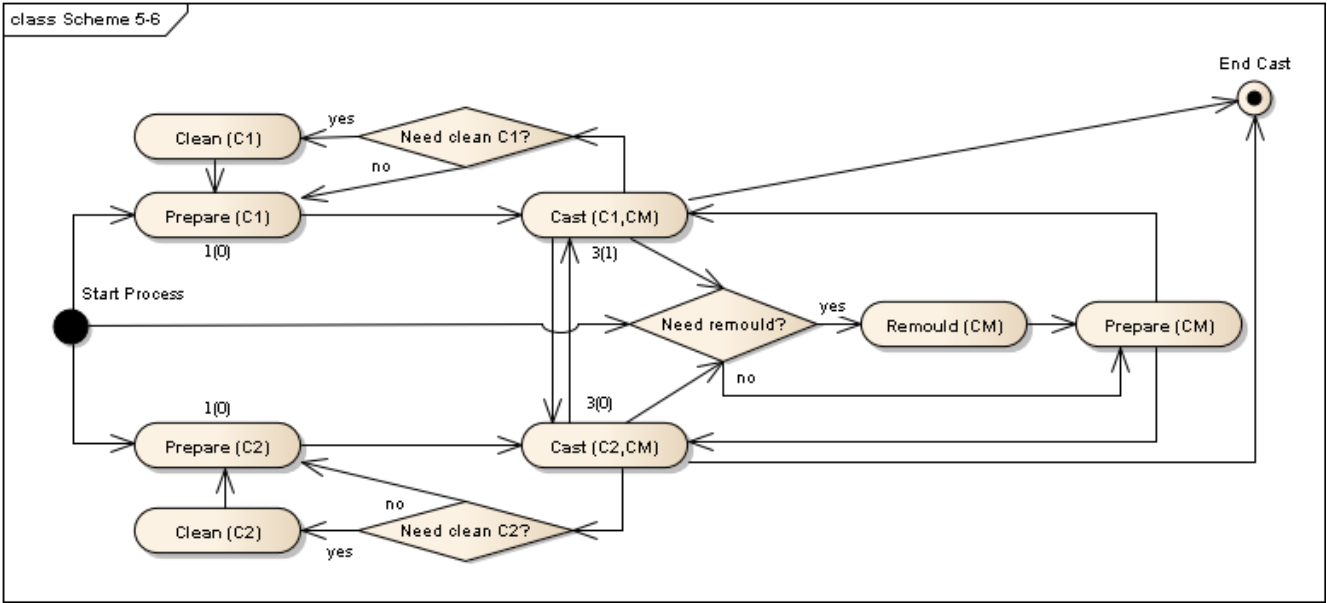
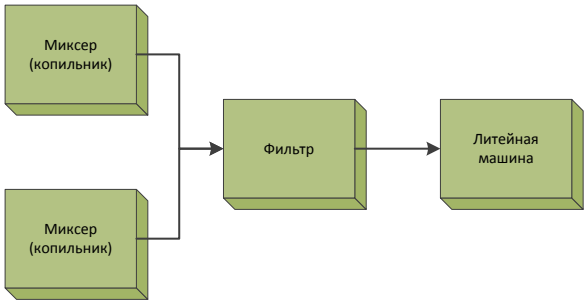
Scheme 5

2 копыльника, 1 литейная машина (количество 10 ЛА на АДВ)



Scheme 6

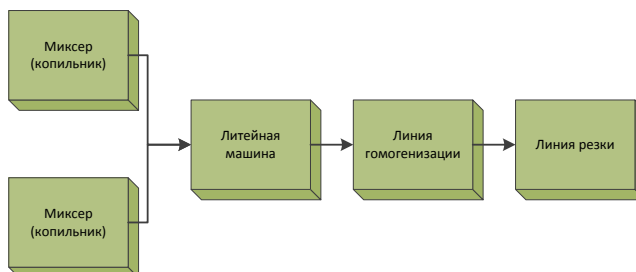
2 копыльника, 1 фильтр тонкой очистки, 1 литейная машина (количество 4 ЛА на АДВ)



Схемы агрегатов с линиями гомогенизации и резки будут рассмотрены отдельно. Сейчас принимается допущение, что готовые слитки извлекаются из литейной машины сразу по окончании литья. Это означает, что задержки в процессах гомогенизации и резки не тормозят процесс литья. Следовательно, для расчета процесса литья по схемам 7 и 8 можно использовать схему 5.

Scheme 7

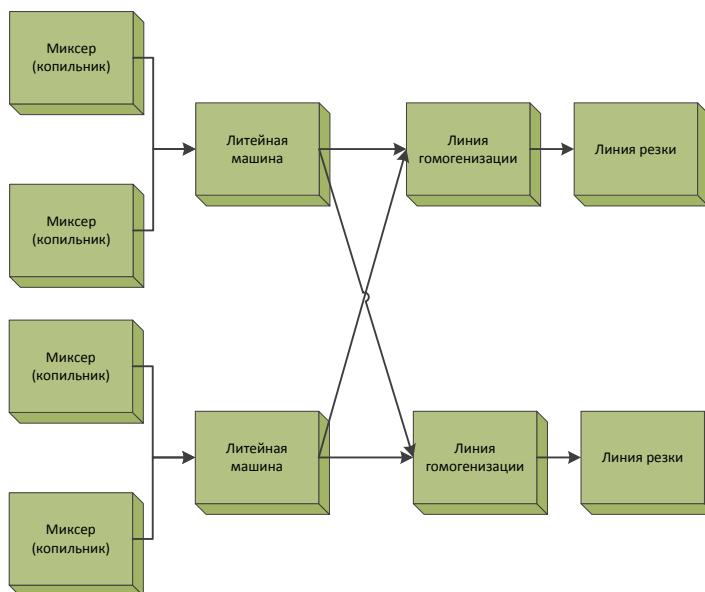
2 копильника, 1 литейная машина, 1 линия гомогенизации и резки (10 ЛА 2 ЛО НКАЗ АДВ)



Аналогично Scheme 5

Scheme 8

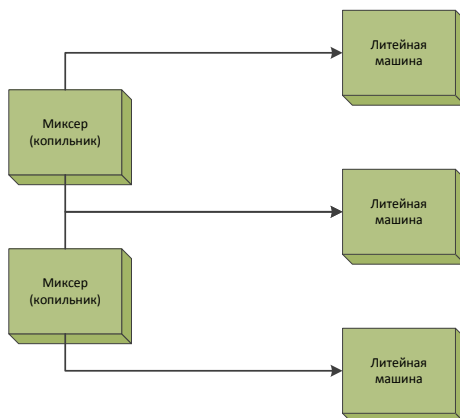
4 копильника, 2 литейная машина (2 литейных агрегата 3 и 4 ЛА 1 ЛО САЗ), 2 линии гомогенизации и резки (количество 1 литейный комплекс на АДВ)



Аналогично Scheme 5

Scheme 9

2 копильника, 3 литейных машины (М2/17 1 ЛО САЗ на АДВ)



Используется 2 режима работы литейного агрегата.

1. При литье через 2-ой конвейер (линия Брошо) работают два миксера. В этом случае схема расчета аналогична схеме 5.
2. При литье через 1-ый и 3-тий конвейеры используется один миксер. В этом случае получается 2 независимых агрегата, работающих по схеме 4.

Судя по имеющимся графикам литья, первый режим основной, а переключение на второй режим осуществляется в периоды недоступности линии Брошо.

Scheme 10

2 копильника, 1 раздатка, 2 литейных машины (количество 2 ЛА на АДВ)

