

УДК 621.746.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.150585

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РАЗДАТОЧНЫХ ПЕЧЕЙ В ЦЕХАХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ ЛИТЬЯ

Доценко Ю. В., Доценко Н. В., Ткачина Е. С., Федоренко В. Н., Цибульский Е. А.

1. Введение

В условиях серийного производства специальных видов литья в цехах с кокильными машинами или машинами литья под давлением необходимо обеспечивать заданную производительность. Однако организовать технологический процесс так, чтобы согласовать требования качества получаемого литья и производительность является сложной задачей. Если принимаемые решения по организации процесса будут неправильными, возможны дополнительные затраты на технологический процесс. Например, возможен перерасход энергоносителей или материальных ресурсов.

Поэтому актуальной является разработка решений в области управления плавлением-заливочными системами таким образом, чтобы обеспечить согласованность разных критериев качества управления – производительность и энергозатраты.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования является плавление-заливочная система цехов специальных видов литья. Данная система включает в себя плавильные печи, раздаточные печи, кокильные машины или машины литья под давлением. Технологический аудит может состоять в хронометраже технологического процесса, который нужен, чтобы определить два основных параметра – интенсивность заявок на расплав (λ , т/ч) и среднее время обслуживания заявки ($\mu = T^{-1}$, ч⁻¹). В отсутствии реальных данных возможно имитационное моделирование, позволяющее для типовых показателей работы цехов специальных видов литья получить оценочные характеристики эффективности функционирования плавление-заливочных систем. Такой подход является обоснованным, так как технические характеристики используемых печей так же хорошо известны, как и технологические возможности применяемого типового оборудования.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является определение оптимальных параметров функционирования плавление-заливочной системы для цехов специальных видов литья, оснащенных кокильными машинами или машинами литья под давлением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить диапазоны типовых технических характеристик оборудования плавление-заливочных систем.
2. Выбрать критерий оптимизации.
3. Провести имитационное моделирование функционирования плавление-заливочных и раздаточных печей.

4. Исследование существующих решений проблемы

Так как плавились-заливочные системы должны обеспечивать машины качественным сплавом, особое внимание уделяется технологическим вопросам получения сплава. Они, в свою очередь, касаются либо целенаправленного воздействия на процессы структурообразования [1, 2], либо комплексного воздействия на расплав в процессе его затвердевания [3, 4]. Однако вопросы, связанные с влиянием времени предложенных технологических операций на вероятность простоя оборудования не рассматриваются. Очевидно, этот вопрос связан с возможностью выбора рационального рабочего пространства и емкости печей. В этой части необходимо говорить о возможности создания новых конструкторских решений по печам, которые и предлагают ведущие мировые производители. В частности, в [5] предложены электрические печи Votta Engineering Srl (Италия), в которых плавильная камера представляет собой монолит из специального огнеупорного бетона, стойкого к воздействию алюминия. Вопрос энергосбережения решается путем качественной теплоизоляции рабочего пространства печи. Температура печи контролируется автоматически двумя термодатчиками, из которых одна расположена в кармане для отбора проб металла, а другая, выполняющая страховочную функцию, – в своде печи. В целях оптимизации рабочей температуры контроль горения может осуществляться по способу «включено-выключено», «минимум-максимум» или с модуляцией.

Компанией Fomet Srl (Италия) предлагаются индукционные тигельные печи типа CR, работающие на промышленной частоте, для плавки, выдержки и обработки любых цветных металлов [6]. Высокопроизводительные плавильные печи для плавки и хранения расплавленного алюминия, печи для литейных машин, а также большие печи-ванны с электромагнитными или механическими насосами циркуляции расплава алюминия, предлагаются компанией Novac Engineering Srl (Италия) [7]. Анализ этих предлагаемых решений в области плавильного оборудования позволяет увидеть главную тенденцию: попытку автоматизации и универсализации конструкторско-технологических решений. Такие решения рассматриваются как альтернатива традиционным подходам, которым присущ недостаток слабой степени автоматизации и возможностям интеграции с другими технологическими системами цеха. Направление развития видится в совмещении технологических операций [8, 9]. Так, например, следует отметить революционную модель компании CIME Crescenzi Induction Melting Srl (Италия). CAP (Coreless Auto Pour) – тигельная печь, которая может выполнять автоматическую разливку под давлением в сочетании с любой автоматической формовочной линией. В этой печи) для улучшения нагрева каналов и повышения общей энергоэффективности применена эллиптическая катушка. В результате в печи CAP каналы находятся в магнитном поле индукционной катушки и нагреваются постоянно. Постоянный и равномерный подогрев дает возможность начинать разливку в любой момент, поскольку исключается затверждение металла или прилипание шлака. Поддержание постоянной температуры сокращает до минимума перегрев и способствует самоочистке печи. Это способствует увеличению сроков между заменой футеровки. Одной из особен-

ностей печи является то, что при отсутствии балластной металлической ванны автоматическая разливочная печь может быть полностью обесточена на выходные дни, после чего работа может быть возобновлена с полужидкой или твердой шихтой [8].

Оптимальное управление металлургическим процессом является особенностью решений, предлагаемых в [9]. В частности, система DuoMelt позволяет обеспечивать плавное распределение мощности преобразователя частоты между двумя печами, работающими последовательно. Это приводит к возможностям полного использования 100 % номинальной мощности постоянно, к более коротким простоям, следовательно, к повышению производительности плавки. Среди преимуществ таких решений следует отметить возможность одновременной плавки, выдержки и разливки, а также максимальной гибкости и исключение пауз при переключении режимов. Управление с помощью системы DuoControl предполагает компьютерную интеграцию. Благодаря этому обеспечиваются более короткие простои, что приводит к более высокой производительности плавки. Это становится возможным благодаря одновременной плавке, выдержке и разливке.

Постоянный контроль и автоматическое управление для всех требуемых функций и технологических операций печи во время цикла плавки обеспечивает процессор плавки JOKS. Данный процессор руководит обменом данными и информацией с системами управления более высокого уровня и обеспечивает протоколирование и оценку рабочих данных. Такие решения могут быть признаны удачными, однако модели и реализуемые на них ИТ-решения в части автоматизации и компьютерной интеграции не раскрываются производителями. Очевидно, моделируя работу плавильно-заливочной системы, необходимо учитывать, что печи являются энерготехнологичными и теплотехническими комплексами, независимо от способа подвода энергии [10, 11]. Их теплотехнические характеристики и энергетические возможности могут оказывать решающее влияние на качество плавки и возможности обеспечения потребителей заданным количеством расплава с требуемыми свойствами.

5. Методы исследования

В качестве методов исследования был выбран математический аппарат, описывающий функционирование систем массового обслуживания, адаптированный для моделирования работы плавильных систем литейных цехов [12]. В частности, рассмотрен наиболее неблагоприятный с точки зрения оценки возможностей системы описания – представление её системой массового обслуживания с отказами (СМО). В соответствии с этим, рассчитывались аналитические и экономические критерии функционирования [13].

Для оценки аналитического критерия рассчитывались следующие параметры:

- начальная вероятность состояния системы, P_0 ;
- вероятность отказа в обслуживании заявки, $P_{отк}$;
- интенсивность потока потерянных заявок, $Q_{ном.з}$;
- вероятность того, что заявка будет обслужена, q ;
- интенсивность потока обслуженных заявок, $Q_{обсл.з}$;

- среднее число занятых каналов, m_k ;
- коэффициент загрузки системы, Ψ .

$$P_0 = \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где n – число каналов в узле обслуживания СМО.

$$P_{отк} = P_0 \frac{\rho^k}{k!}, \quad (2)$$

где k – номер канала, который обслуживает заявку ($k=1, 2, 3, \dots, n$).

$$Q_{пот.з} = \lambda P_{отк}, \quad (3)$$

$$q = 1 - P_{отк}, \quad (4)$$

$$Q_{обсл.з} = \lambda q, \quad (5)$$

$$m_k = \frac{\lambda q}{\mu} = \rho q, \quad (6)$$

$$\Psi = \frac{m_k}{n}, \quad (7)$$

где Ψ – коэффициент загрузки системы (аналог КПД).

Для оценки экономического критерия рассчитывались суммарные затраты на функционирование системы:

$$W(n) = C_1 \lambda P_{отк}(n) + C_2 [n - m_k(n)], \quad (8)$$

где C_1 – величина затрат, связанных с простоями системы; C_2 – величина затрат, связанных с эксплуатацией системы.

Критерий (8) минимизируется по n , т. е. должно быть найдено такое значение n^* , которое обращает в минимум критерий (8). Найденные таким способом значения формируют вектор выходных переменных для получения уравнения регрессии вида $n^* = f(\lambda, \mu)$. Выбор диапазонов значений этих переменных определяется возможностями раздаточных печей емкостью 0,16–0,25 т. Каждая такая пара входных переменных, подобранная специальным образом, формирует точку центрального ортогонального плана эксперимента. Следовательно, может быть реализован активный эксперимент для построения уравнения регрессии. Диапазоны входных переменных выбирались следующим образом:

$x_1=\lambda=[0,1;0,5]$, $x_2=\mu=[0,03;0,07]$, нормирование выполнялось стандартной процедурой, переводящей указанные диапазоны натуральных значений в $[-1;+1]$. Оптимизация выполнялась гребневым анализом на основе параметрического описания вида [14]:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r(\lambda) = \sqrt{x^{*'} x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a' x^* + x^{*'} A x^*, \end{cases} \quad (9)$$

где a_0, a, A – оценки коэффициентов в уравнении регрессии;

$x_i^* = a_i (2\lambda)^{-1}$ – субоптимальные значения входных переменных – λ, μ ;

$r = \sqrt{r^2}$, $r^2 = \sum_{i=1}^n [a_i (2\lambda)^{-1}]^2$ – ограничения в пространстве факторов $\lambda - \mu$;

$y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i^2 (2\lambda)^{-1}$ – субоптимальные значения выходной переменной,

$y^*=n^*$.

6. Результаты исследований

Результаты гребневого анализа, являющиеся итоговыми в решении задачи, приведены на рис. 1, 2.

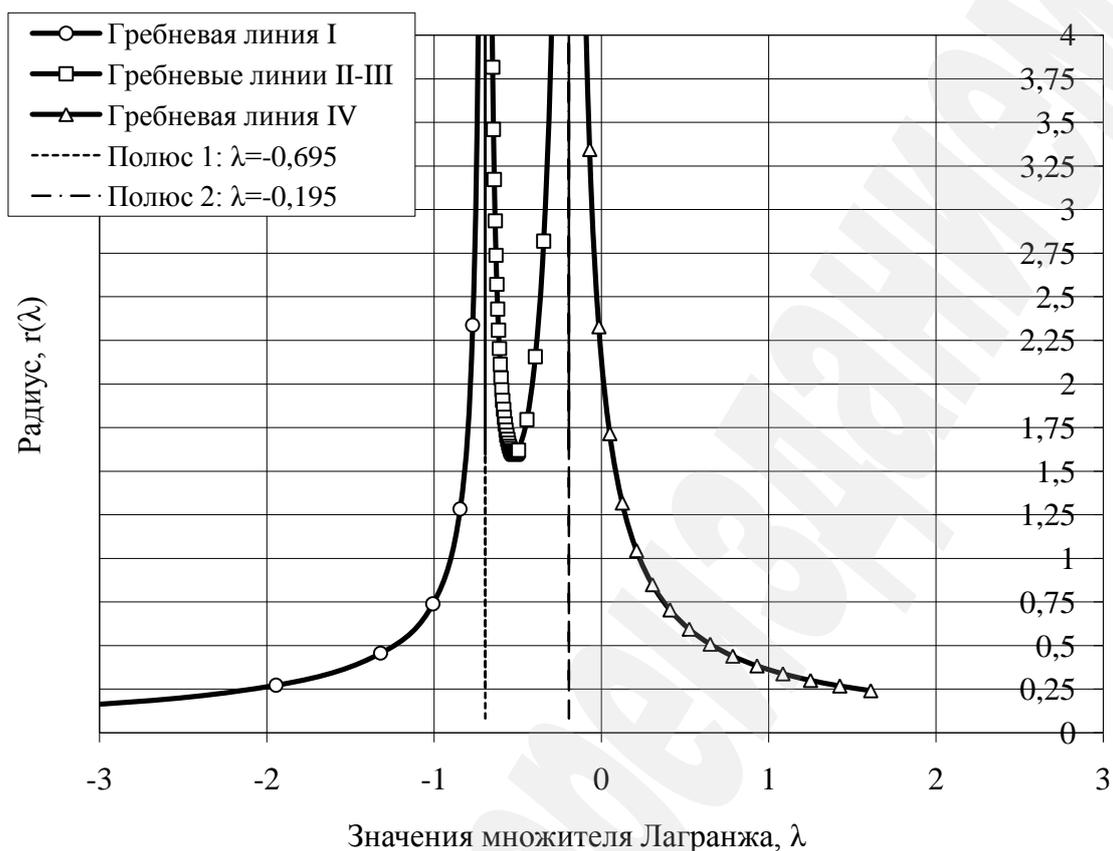


Рис. 1. Параметрическое описание ограничений на входные переменные

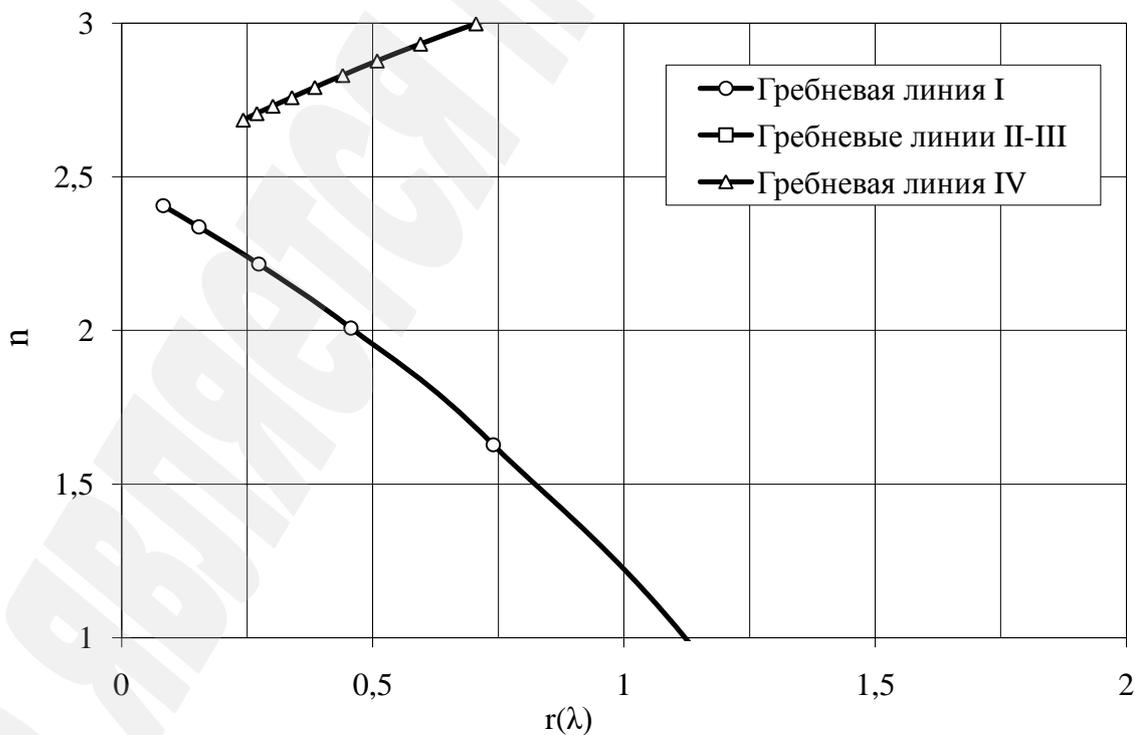


Рис. 2. Параметрическое описание оптимальных решений

Из рис. 1, 2 видно, что в области ограничений, накладываемых планом эксперимента, оптимальные решения находятся на ридневых линиях I и IV. При этом

для выбора пар $(\lambda - \mu)$, удовлетворяющих оптимальным решениям $y^*=n^*$, может быть использовано первое параметрическое уравнение системы (9).

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильной стороной данного исследования является возможность определения оптимальной загрузки печей по компромиссному критерию – минимизации суммарных затрат по простоям и энергозатратам. Полученные решения являются аналитическими и позволяют выполнять расчеты при фактических показателях функционирования плавильно-заливочных систем в литейном цехе. Это открывает перспективы снижения себестоимости продукции.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что полученные решения являются приемлемыми только внутри рассмотренной области значений входных переменных. Если интенсивность заявок на расплав и среднее время их обслуживания находится вне пределов этой области, результаты будут отличаться от полученных. Использование полученных оптимальных решений без учета этого обстоятельства может привести к неправильным выводам относительно целесообразной загрузки печей.

Opportunities. Дополнительные возможности при использовании приведенных результатов в промышленных условиях связаны с рационализацией организации кампании плавки. Принимаемые при этом организационно-технические решения могут способствовать повышению показателей функционирования плавильно-заливочных систем литейного цеха.

Threats. Очевидные риски при использовании полученных результатов связаны с необходимостью внесения изменений в систему управления литейного цеха. Причем обязательной является адаптация теоретических решений к реальным показателям функционирования плавильно-заливочного оборудования и кокильных машин (машин литья под давлением). Любое ошибочное решение в этом случае может приводить к неоправданным затратам.

8. Выводы

1. Установлено, что типовые решения по плавильному оборудованию – плавильным и раздаточным печам – в цехах алюминиевого литья предполагают использование печей, для которых интенсивность заявок на расплав составляет $(0,1-0,5)$ т/ч, а величина, обратная среднему времени обслуживания заявок находится в диапазоне $(0,03-0,07)$ мин⁻¹.

2. В качестве критерия оптимизации необходимо выбирать компромиссный критерий, формирующийся из затрат технологической электроэнергии и затрат по причинам простоев оборудования вследствие отсутствия расплава в заданном количестве. Эти две составляющие критерия являются конкурентными по отношению друг к другу.

3. Имитационным моделированием установлены оптимальные решения по загрузке печей. Они определены в зависимости от интенсивности заявок на расплав со стороны кокильных машин или машин литья под давлением, и среднего времени выполнения этих заявок. Показано, что такие оптимальные решения могут быть записаны в параметрическом виде $n^*=\varphi(r(\lambda))$. Такое представ-

ление позволяет рассчитывать оптимальную загрузку печей в зависимости от ограничений, накладываемых диапазонами входных переменных. Такими переменными являются параметры функционирования плавильно-заливочных систем: интенсивность заявок на расплав и среднее время их обслуживания, зависящее от технических характеристик используемых печей.

Литература

1. Influence of heterogeneous crystallization conditions of aluminum alloy on its plastic properties / Dotsenko Yu. et. al. // *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2015. Issue 3 (147). P. 46–50.
2. Доценко Ю. В., Селиверстов В. Ю. Особенности затвердевания отливок из алюминиевых сплавов при нарастающем давлении и модифицировании // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 1/5 (55). С. 18–22. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3378>
3. Доценко Ю. В., Селиверстов В. Ю. Влияние комплексной технологии на свойства отливок из сплава АК7ч с повышенным содержанием железа // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 6/5 (54). С. 45–48. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2282>
4. Effect of Additions of Ceramic Nanoparticles and Gas-Dynamic Treatment on Al Casting Alloys / Borodianskiy K. et. al. // *Metals*. 2015. Vol. 5, Issue 4. P. 2277–2288. doi: <http://doi.org/10.3390/met5042277>
5. Botta Management Group. URL: <http://www.bottagroup.it/>
6. FOMET. URL: <http://www.fomet.com>
7. HTE Novac. URL: <http://www.novac.it>
8. Cime Srl. URL: <http://www.cime-srl.com>
9. OTTOJUNKER. URL: <http://www.otto-junker.de>
10. Труфанов И. Д., Чумаков К. И., Бондаренко А. А. Общетеоретические аспекты разработки стохастической системы автоматизированной экспертной оценки динамического качества производственных ситуаций электросталеплавления // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2005. № 6/2 (18). С. 52–58.
11. Parametric study of heat transfer in an electric arc furnace and cooling system / Khodabandeh E. et. al. // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 123. P. 1190–1200. doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.193>
12. Дёмин Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой // *Технологический аудит и резервы производства*. 2011. № 1/1 (1). С. 15–24. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4082>
13. Производственно-технологическая комплектация литейных цехов: справочное пособие / Дёмин Д. А., Дёмина Е. Б., Акимов О. В. и др.; под общ. ред. Дёмина Д. А. Харьков: Технологический Центр, 2012. 320 с.
14. Demin D. Synthesis of optimal control of technological processes based on a multialternative parametric description of the final state // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, Issue 4 (87). P. 51–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.105294>