

УДК 658

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© 2015 А.С. Клентак

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 30.07.2015

В статье рассматривается выявление потенциала повышения энергоэффективности элементов литейного производства на основании составления и решения математической модели многокритериальной оптимизации методом Парето. В модели составляются целевая функция на основании экспертных оценок, а также затратная функция по рассматриваемому технологическому процессу литейного производства машиностроительного предприятия. Для сужения парето-оптимальных альтернатив в исследовании применен эксергетический анализ, направленный на определение степени термодинамического совершенства рабочих процессов оборудования.

Ключевые слова: энергосберегающие мероприятия, технологический процесс литейного производства, математическая модель многокритериальной оптимизации, оптимальность по Парето, эксергия, эксергетический к.п.д., эксергетический анализ.

Деятельность каждого машиностроительного предприятия в значительной мере зависит от имеющихся в его распоряжении топливно-энергетических ресурсов. Нерациональное их использование приводит к повышению себестоимости продукции. Для отечественной экономики решение проблем рационального использования топливно-энергетического потенциала страны и эффективного управления топливно-энергетическими ресурсами на предприятиях является одними из наиболее приоритетных направлений в промышленной политике[1].

Вопрос выбора стратегии модернизации промышленных объектов, особенно при ограничениях по техническим средствам и капитальным вложениям, имеет важное значение при решении задач, связанных с экономией топлива и энергии в промышленности.

Для решения поставленной задачи, это исследование применяет декомпозицию технологического цикла получения кокильной отливки «Крыльчатка» на отдельные элементы – участки; анализ энергоемких видов оснастки, оборудования и инструментов на основании анкет «Характеристик исходного (возможного) состояния элементов»; расчет математической модели с функциями энергоэффективности и затрат; нахождение парето-оптимальных альтернатив; эксергетический анализ; выставление рекомендаций.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Составление набора элементов технологического цикла

В работе рассматривается литейных цех, имеющий несколько технологических потоков, *Клентак Анна Сергеевна, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей. E-mail: anna_klentak@mail.ru*

каждый из которых может выпускать отливки из одной или нескольких марок металла. Образование исходного множества элементов в нашем случае будет состоять в разбиении технологического цикла получения кокильной отливки «Крыльчатка» из алюминиевого сплава ПП-2000М на отдельные элементы – участки, согласно рисунку 1. В итоге прохождения одного полного цикла на выходе получается около 8 изделий. В месяц цикл повторяется 3-4 раза[2].

Плавильный и заливочный участки будут рассматриваться в данной работе, как один элемент, вследствие неразрывности этих двух участков технологического процесса. Заданное множество элементов представлено в виде табл. 1.

Анализ энергоемких видов оборудования на основании анкет «характеристика исходного (возможного) состояния элементов»

На данном этапе каждый элемент с помощью анкет «Характеристик исходного (возможного) состояния элементов» был рассмотрен экспертом с точки зрения выполнения общей задачи – снижение потребления энергоресурсов [2].

После анализа данных анкет для каждого элемента получаем следующее:

1. Для стержневого участка:

$$Char_{1 \text{ и.с.}} = 7;$$

$$Char_{1 \text{ в.с.}} = 6,5.$$

2. Для плавильно - заливочного участка:

$$Char_{2 \text{ и.с.}} = 5;$$

$$Char_{2 \text{ в.с.}} = 5.$$

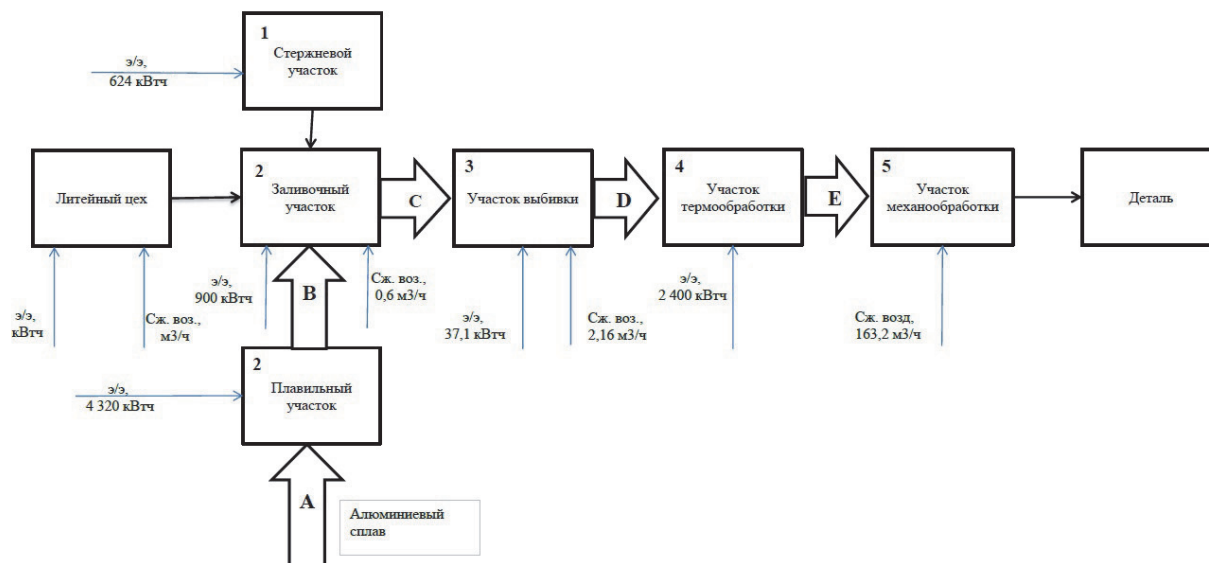


Рис. 1. Схема технологического цикла получения кокильной отливки «Крыльчатка»

Таблица 1. Множество элементов

№ эл-та «к»	Наименование (код) k-го элемента	Оборудование
1	Стержневой участок	Смеситель (бегуны) модели 15112, Камерное сушило № 500/45 НА
2	Плавильно - заливочный участок	Плавильная печь сопротивления ПП-2000М, вакуумно-раздаточная печь ВРП-0,25
3	Участок выбивки	Отбойный молоток МОП-2, выбивная решетка мод. 421, станок ленточнопильный СРЗ-200-02
4	Участок термической обработки	Камерная печь с толкателем ПНТ88-1
5	Участок механической обработки	Высокоскоростная прямая шлифовальная машинка ST 100

3. Для участка выбивки:

$$Char_{3 \text{ и.с.}} = 7;$$

$$Char_{3 \text{ в.с.}} = 6.$$

4. Для участка термической обработки:

$$Char_{4 \text{ и.с.}} = 7,5;$$

$$Char_{4 \text{ в.с.}} = 6.$$

5. Для участка механической обработки:

$$Char_{1 \text{ и.с.}} = 5;$$

$$Char_{1 \text{ в.с.}} = 5,5.$$

Составление математической модели

Целевой функцией в составляемой математической модели будет являться отношение характеристики возможного состояния к исходному состоянию элемента, показывая тем

самым потенциал возможной модернизации для повышения энергоэффективности рассматриваемого элемента. Таким образом, целевая функция принимает следующий вид:

$$EF = \frac{Char_{k \text{ в.с.}}}{Char_{k \text{ и.с.}}} \rightarrow \max.$$

Для каждого элемента получаем:

1) $EF_1 = 0,929;$

2) $EF_2 = 1;$

3) $EF_3 = 0,857;$

4) $EF_4 = 1,25;$

5) $EF_5 = 1,1.$

Также для принятия решения о проведении энергоэффективных мероприятий очень важным фактором является оценка затрат, которые несет предприятие на данном участке. Поэтому в мо-

дель вводиться затратная функция, как сумма затрат на энергоресурсы и экологические платежи на рассматриваемом технологическом потоке машиностроительного предприятия. Целевая и затратная функции устремляются к максимуму, т.к. чем больше затрат несет предприятие на отдельно взятом участке технологического процесса и, чем больше потенциал энергоэффективности от проведения энергоэффективных мероприятий на данном участке, тем более рентабельным становится проведение модернизации именно этого участка технологического потока. Как видно из рисунка 1 на рассматриваемом технологическом процессе машиностроительного предприятия затраты на энергоресурсы складываются из затрат на электрическую энергию и сжатый воздух. Затратная функция принимает вид:

$$Z = Z_э + Z_{сж.в.} + Z_{э.к.} \rightarrow \max.$$

Расход электроэнергии на каждом участке технологического процесса находится следующим образом:

$$Z_э = \sum_{l=1}^n P_l \cdot T_l \cdot z_l \cdot \tau_{э/э},$$

где P_l – потребляемая мощность оборудования каждого типа, кВт.,

T_l – время работы оборудования, ч.,

z_l – количество загрузок оборудования, шт.,

$\tau_{э/э}$ – тариф на расход 1 кВтч электрической энергии, руб/кВтч.

Расход сжатого воздуха на каждом участке технологического процесса находится следующим образом:

$$Z_{сж.в.} = \sum_{l=1}^n z_l \cdot V_l \cdot T_l \cdot \tau_{сж.в.},$$

где z_l – количество загрузок оборудования, шт.,

V_l – расход сжатого воздуха, потребляемого оборудованием каждого типа, м³/ч.,

$\tau_{сж.в.}$ – тариф на расход 1 м³ сжатого воздуха, руб/м³.

Крупными источниками пыле- и газовойдыления в атмосферу в рассматриваемом технологическом процессе являются плавильные печи, участок приготовления и смешивания смеси, а также участок выбивки и очитки литья. Затраты на экологические платежи находятся в модели следующим образом:

$$Z_{э.к.} = \sum_{l=1}^n q_l \cdot B_l \cdot \left(1 - \frac{\eta_T \cdot A}{100}\right) \cdot \tau_{э.к.},$$

где q_l – удельное выделение веществ на единицу продукции на заданном участке технологического процесса [6], кг/т,

B_l – количество перерабатываемого материала за месяц на заданном участке технологического процесса, т.,

η_m – эффективность очистки улавливающих аппаратов [6], %

A – коэффициент, учитывающий исправную работу очистного оборудования.

$\tau_{э.к.}$ – норматив платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ [5], руб.

Затраты на каждом участке технологического процесса составляют:

1) $Z_1 = 2\,852,94$ руб.;

2) $Z_2 = 20\,902,96$ руб.;

3) $Z_3 = 423,84$ руб.;

4) $Z_4 = 9\,600$ руб.;

5) $Z_5 = 22\,964,37$ руб..

В итоге математическая модель принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} EF = \frac{Char_{к.в.с.}}{Char_{к.и.с.}} \rightarrow \max, \\ Char_{к.и.с.} = \sum_{j=1}^8 a_j \cdot \alpha_j, \text{ где} \\ 0 \leq a_j \leq 1, \\ 0 \leq \alpha_j \leq 1 \\ Char_{к.в.с.} = \sum_{i=1}^8 b_i \cdot \beta_i, \text{ где} \\ 0 \leq b_i \leq 1, \\ 0 \leq \beta_i \leq 1 \\ Z = Z_э + Z_{сж.в.} + Z_{э.к.} \rightarrow \max, \\ Z_э = \sum_{l=1}^n P_l \cdot T_l \cdot z_l \cdot \tau_{э/э}, \\ Z_{сж.в.} = \sum_{l=1}^n z_l \cdot V_l \cdot T_l \cdot \tau_{сж.в.}, \\ T_l^{норм.} \leq T_l \leq T_l^{факт.} \\ Z_{э.к.} = \sum_{l=1}^n q_l \cdot B_l \cdot \left(1 - \frac{\eta_T \cdot A}{100}\right) \cdot \tau_{э.к.}, \\ \tau_{э.к.} \begin{cases} \tau_{э.к.}^{ПДВ} \\ \tau_{э.к.}^{ПВ} \end{cases} \end{array} \right.$$

$\alpha_i(\beta_j)$ и $a_i(b_j)$ – соответственно весовой коэффициент показателя исходного (возможного) состояния элемента и сам показатель;

$\tau_{э.к.}^{ПДВ}$ – норматив платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ в пределах установленных допустимых нормативов выбросов [8], руб.,

$\tau_{э.к.}^{ПВ}$ – норматив платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов выбросов [8], руб.

В ходе решения данной модели было получено множество эффективных, или оптимальных по Парето, альтернатив: участок термообработки и участок механообработки [2].

Выделение множества Парето можно рассматривать лишь как предварительный этап оптимизации, и налицо проблема сокращения этого множества. Дальнейший поиск во множестве эффективных решений может быть осуществлен только на основе применения принципов принятия решений.

Самый простой способ сужения множества Парето – это исключение какого-то одного вектора из пары парето-оптимальных векторов после их сравнения; иначе говоря, – предпочтение одного парето-оптимального вектора другому. В рассматриваемой задаче в качестве определяющего критерия будет выступать – эксергетический к.п.д. участков технологического процесса, т.е. чем ниже данный показатель, тем необходимее на данном участке проведение модернизации. Для нахождения эксергетического к.п.д. применим эксергетический анализ, проводимый на основе метода эксергетических потоков.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КОКИЛЬНОЙ ОТЛИВКИ «КРЫЛЬЧАТКА»

Основные эксергетические характеристики потоков веществ, участвующих в процессе, рассчитываются в определенных точках теплотехнической схемы (рис. 1), которые соответствуют состоянию веществ на входе в тот или иной аппарат и на выходе из него. Параметрами, определяющими это состояние, являются давление, температура, расход. Принимается следующее допущение, что изменение параметров происходит только внутри аппаратов, т.е. величина

термодинамических координат на выходе из одного аппарата равна их величине на входе в следующий аппарат по ходу технологического процесса.

В данном исследовании рассматривается термическая и механическая эксергия веществ. Поскольку значения термической эксергии в несколько раз, а в отдельных точках рассматриваемой технологической схемы и на порядки, превышают соответствующие значения механической эксергии, то для данного исследования было решено опустить значение механической эксергии [7,8].

Термическая эксергия является результатом несовпадения температур потока и окружающей среды и рассчитывается по формуле (1):

$$E_T = C_p(T - T_0) - C_p T_0 \ln \frac{T}{T_0},$$

где C_p – удельная теплоемкость алюминиевого сплава, кДж/кг·С°, T – температура алюминиевого сплава, С°, T_0 – температура окружающей среды, С°, E_T – удельная термическая эксергия, кДж/кг.

На рис. 2 приведен график изменения удельной термической эксергии в точках главной линии схемы производства кокильной отливки.

Как видно из графика, в точке А происходит загрузка элементов для приготовления алюминиевого сплава в плавильную печь, температура при которой происходит выплавка сплава 620-640 градусов (А-В). Далее сплав переливается в вакуумно-раздаточную печь, при чем теряет порядка 10 градусов (В₁), и выдерживается там при температуре 620-640 градусов (В-С) после чего заливается в кокиль до полного остывания (С-Д).

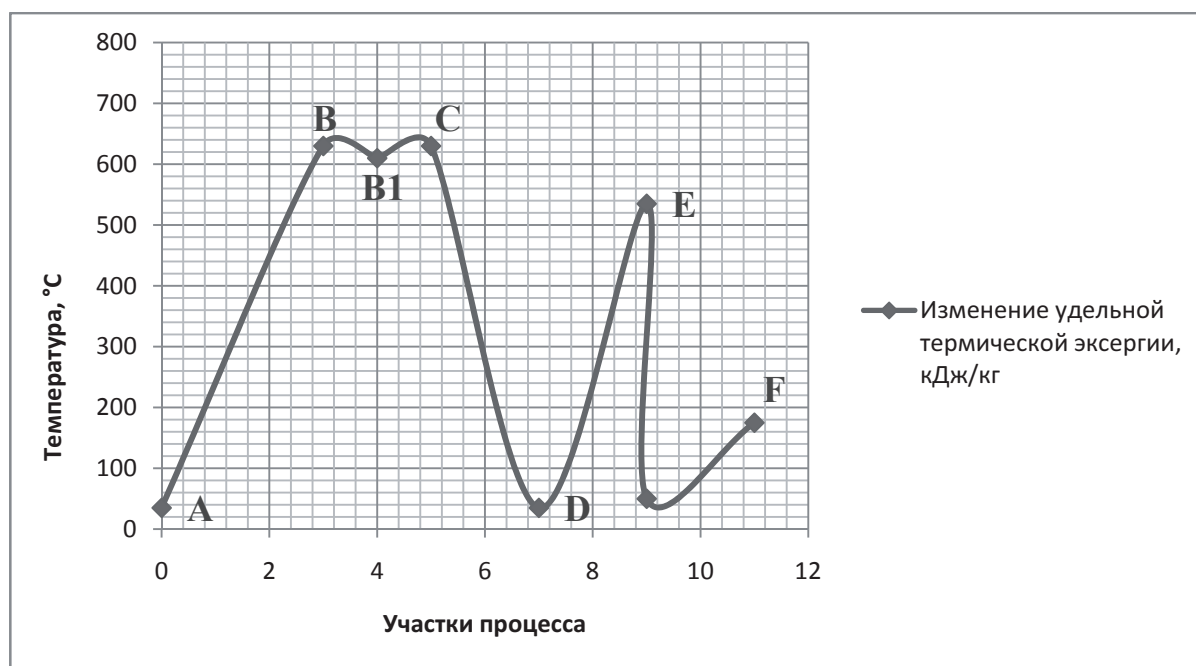


Рис. 2. График изменения удельной термической эксергии

После выбивки, происходящей при температуре окружающего воздуха, отливки переходят на этап термообработки (D-E-F), где выдерживаются в камерной печи при температуре 535 градусов в течение 6 часов, после чего происходит закалка с резким охлаждением отливок до 20-100 градусов. Затем на этапе старения их выдерживают еще в течение 10 часов при температуре 175 градусов.

Таким образом, колебания значений термической эксергии обусловлены изменением температуры потока.

В процессе производства кокильных отливок, главное технологическое оборудование, через которое проходят значительные потоки эксергии, представлено плавильной печью, вакуумно-раздаточной печью ВРП-0,25 и камерной печью с толкателем ПНТ88-1. Соответственно именно их эксергетические к.п.д. выбраны для расчета с целью дальнейшего оценивания эксергетической эффективности работы данных установок.

Согласно определению, эксергетический к.п.д. есть отношение полученного в системе полезного эксергетического эффекта к общим затратам эксергии [9], т. е.

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{E_{\text{пол}}}{E_{\text{зат}}},$$

где η_{ε} – эксергетический к.п.д. установки на определенном процессе, $E_{\text{пол}}$ – полезного эксергетического эффекта, кВт, $E_{\text{зат}}$ – общие затраты эксергии, кВт.

В печах затраченная эксергия определяется подведенной электрической энергией, которая равна отношению номинальной электрической мощности, т. е. полезно используемой части подведенной эксергии к механическому к.п.д. печи. А полученный полезный эксергетический эффект есть разность термомеханической эксергии сжимаемого тела на входе в печь и на выходе из нее. Следовательно, формула (2) примет вид:

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{E_{\text{вых}} - E_{\text{вх}}}{N_{\text{ном}} \eta_{\text{м.к}}},$$

где $E_{\text{вых}}$, $E_{\text{вх}}$ – термомеханическая эксергия алюминиевого сплава на выходе из печи и на входе в нее соответственно, кВт, $N_{\text{ном}}$ – номинальная электрическая мощность печи, кВт, $\eta_{\text{м.к}}$ – механический к.п.д. печи.

Для рассматриваемых установок эксергетический к.п.д. составляет:

- плавильная печь – 72,4 %;
- вакуумно-раздаточная печь – 2,07 %;
- в процессе закалки для камерной печи – 17,6%;
- в процессе старения для камерной печи – 2,07%,

Данные результаты свидетельствуют о несовершенстве функционирования данного вида оборудования.

При анализе полученных результатов стано-

вится ясным, что менее эффективными с эксергетической точки зрения являются участки заливки и термообработки. Элементом с максимальным негативным воздействием на окружающую среду является камерная печь при процессе старения заготовок.

Основываясь на данных проведенного эксергетического анализа, получили, что самый низкий из рассматриваемых установок эксергетический к.п.д. на участке термообработки.

Далее последовательность элементов литейного производства для проведения на них мероприятий по повышению энергоэффективности, сохраняя выше описанный подход, выстраивается следующим образом:

1. Участок термообработки;
2. Участок механообработки;
3. Плавильно-заливочный участок;
4. Стержневой участок;
5. Участок выбивки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайнутдинова, И.А. Эффективность методов материалосбережения в организации производственных процессов: на примере крупного машиностроительного предприятия: автореф. дис. канд. экон. наук. 05.02.22 / Гайнутдинова Ильсеяр Азаровна. – Казань, 2005.
2. Клентак, А.С. Формирование последовательности энергосберегающих мероприятий для машиностроительных предприятий Самарской области / А.С. Клентак // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – № 2. – С. 151-157.
3. Вагин, Г.Я. Экономия энергии в промышленности: Учеб. Пособие / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов. – Нижегород. гос. техн. ун-т., НИЦЭ. Н. Новгород, 1998. 220 с.
4. Соколов, А.В. Литье по выплавляемым моделям с использованием продуктов переработки алюминиевых шлаков / А.В. Соколов, С.А. Рязанов, Н.Н. Зонненберг // Литейное производство. – 2012. – №7. – С.31-32.
5. Постановление Правительства РФ от 12.06.2003 N 344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления»
6. Бондалетова, Л.И. Расчет выбросов загрязняющих веществ от литейных цехов: Методическое пособие по выполнению практической работы по курсу «Промышленная экология» для студентов специальности 320700 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» / Л.И. Бондалетова, В.Т. Новиков, Н.А. Алексеев. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 34 с.
7. Бродянский, В.М. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / В.М. Бродянский. – Ин-т технической теплофизики, Киев, 1991. – 360 с.
8. Плотников, В.В. Анализ термодинамической эффективности стадии полимеризации этилена / В.В. Плотников, Ю.С. Сидорова // Нестационарные,

энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, nano- и биотехнологии - НЭРПО-2011: Материалы конференции (Тексты докладов и аннотации). – 2011.

9. Назмеев, Ю.Г. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности / Ю.Г. Назмеев, И.А. Коныхина. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 364 с.

DETECTION OF POTENTIAL ENERGY EFFICIENCY ELEMENTS FOUNDRY BASED ON MATHEMATICAL MODELS AND EXERGY ANALYSIS

© 2015 A.S. Klentak

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article deals with the identification of potential energy efficiency elements foundry on the basis of setting up and solving the mathematical model of multi-criteria optimization method Pareto. The model is the objective function on the basis of expert assessments, as well as costly function of the subject process technology of foundry of machine building enterprise. To narrow the Pareto-optimal alternatives in the study applied exergy analysis aimed at determining the degree of thermodynamic perfection workflows equipment. *Keywords:* energy saving measures, process technology of foundry, mathematical model of multi-criteria optimization, Pareto optimality, exergy, exergy efficiency, exergy analysis.