

Повышение энергетической эффективности газовых литейных миксеров вместимостью 25 т

*Панов Е.Н., Боженко М.Ф., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В., Билько В.В.
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

Приведены экспериментальные тепловые потери наружными ограждениями раздаточного миксера емкостью 25 т с газовым нагревом. Даны результаты расчетов энергетической эффективности газового миксера при замене теплоизоляции из пенодиатомита на силикат кальция, а также при использовании теплоты уходящих дымовых газов для нагрева дутьевого воздуха.

Ключевые слова: миксер, алюминий, футеровка, теплоизоляция, тепловые потери, энергетический баланс, дымовые газы, природный газ.

Наведені експериментальні теплові втрати зовнішніми огороженнями роздавального міксера ємністю 25 т з газовим нагрівом. Наведені результати розрахунків енергетичної ефективності газового міксера при заміні теплоізоляції з пінодіатоміту на силікат кальцію, а також при використанні теплоти димових газів, що відходять, для нагрівання дуттьового повітря.

Ключові слова: міксер, алюміній, футеровка, теплоізоляція, теплові втрати, енергетичний баланс, димові газы, природний газ.

Experimental data from side wall surfaces heat losses of distribution mixer of 25 tons storage capacity with gas heater are represented. Calculated results of mixer energy efficiency are performed for such measures implementation: heat insulation of foam diatomite to calcium silicate replacement and heat recovery for blowing air heating.

Keywords: mixer, aluminium, refractory, heat insulation, heat losses, energy balance, smoke fumes, natural gas.

Литейные миксеры на алюминиевых заводах с завершенным технологическим циклом используются для достижения требуемой температуры и состава наработанного в электролизерах алюминия перед подачей его на литейные машины. Они работают на двух видах обогрева – электрическом и пламенном.

Известны технологические преимущества электрических миксеров – в них, например, частично дегазируется металл и не увеличивается его газонасыщенность [1].

Ранее нами были проведены расчетно-экспериментальные исследования литейных миксеров и печей для переплавки алюминиевого лома с электрическим нагревом [2-4].

Однако к эксплуатационным недостаткам электрических миксеров относится необходимость частой смены вышедших из строя нагревательных элементов,

расположенных в своде. Кроме этого, в ряде случаев применение газового нагрева может быть выгоднее с экономической точки зрения.

В настоящей работе представлены результаты выполненных нами исследований раздаточных миксеров емкостью 25 т с газовым обогревом, применяемых на одном из алюминиевых заводов для подготовки к литью алюминиевых слитков (рис.1).

В качестве первого футеровочного слоя всех ограждающих поверхностей применен огнеупорный шамот класса А толщиной, например, 230 мм в подине и своде, 345 мм в боковых и торцевых стенках; вторым слоем футеровки (только в подине) является шамот-легковес толщиной 200 мм.

Для теплоизоляции ограждений использован пенодиатомит, толщина которого равна 185 мм в горизонтальной части подины и 660 мм - в наклонной; 65 мм – в боковых и торцевых стенках, и 113 мм – в своде.

Выравнивающими слоями служат засыпка глиноземная и диатомитовая. Диатомитовая засыпка применена и для теплоизоляции свода.

Кроме этого, внутреннюю поверхность кожуха миксера выкладывают листовым асбестом толщиной 10 мм (в 2 слоя – до уровня металла и в 1 слой – остальное).

Следует отметить, что футеровочные слои, находящиеся в зоне расплава, полностью или частично пропитываются алюминием, а теплоизоляционные – пропитываются частично или не пропитываются вообще.

В соответствии с технологией алюминий-сырец, поступающий в литейное отделение из электролизных корпусов в ковшах, взвешивается и отстаивается в них в течение 15 мин. Затем с поверхности алюминия снимается шлак и ковши выливаются либо в миксер-копильник, либо непосредственно в раздаточный миксер.

После заливки из ковшей в раздаточный миксер очередной порции металла производится его отстой не менее 15 мин, снимается шлак и создается покровный слой путем подачи карналлитового флюса. После отливки каждой партии слитков процедура, описанная выше, повторяется.

В раздаточных миксерах, работающих с постоянным подливом через копильник, поддерживается уровень металла не менее 2/3 их емкости.

Для одного из эксплуатируемых миксеров экспериментально определяли тепловые потери наружными ограждающими поверхностями

$$Q_{pi} = \bar{q}_i F_i,$$

где \bar{q}_i – усредненная плотность теплового потока, Вт/м²; F_i – теплоотдающая поверхность ограждения, м².

Плотность теплового потока

$$\bar{q} = \bar{\alpha} (\bar{t}_{нар} - t_{окр}),$$

где $\bar{\alpha}$ - суммарный коэффициент теплоотдачи (конвекцией и излучением) от наружных поверхностей к окружающему воздуху, Вт/(м² · К); $\bar{t}_{нар}$ - средняя температура наружной поверхности, °С; $t_{окр}$ - температура окружающего воздуха, °С.

Для расчета коэффициента теплоотдачи использовали формулу

$$\bar{\alpha} = a_0 + a_1(\bar{t}_{нар} - 30) - a_2(\bar{t}_{нар} - 30)^2 + a_3(\bar{t}_{нар} - 30)^3,$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – постоянные коэффициенты, зависящие от вида теплоотдающей поверхности [1].

Датчиками для измерения температур наружных поверхностей служили прижимные хромель-алюмелевые термопары индивидуального изготовления и градуировки, переносной оптический термопойнт “AGEMA”.

По чертежам миксера, а в ряде случаев и натурными измерениями, определяли теплоотдающие поверхности наружных ограждений миксеров (боковых и торцевых стенок, подины, свода, выступающих частей кармана для литья и др.).

Перед проведением измерений предварительно составляли эскиз каждой поверхности; затем эту поверхность делили на элементарные поверхности в виде квадратов, в центре каждого из которых и производили измерения температур. Результаты экспериментов и расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные теплотери наружными ограждениями раздаточного миксера

| Наименование ограждения | $F_i, \text{ м}^2$ | $\overline{t}_{\text{нар}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\overline{b}, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ | $\overline{q}, \text{ Вт}/\text{м}^2$ | $Q_{\text{пи}}$ | |
|---|--------------------|---|--|---------------------------------------|-----------------|------|
| | | | | | кВт | % |
| 1. Боковая передняя стенка | 24.1 | 60 | 11.96 | 648 | 15.6 | 19.0 |
| 2. Боковая задняя стенка (без газохода) | 19.4 | 61 | 12.03 | 669 | 13.0 | 15.8 |
| 3. Торцевая правая стенка | 13.8 | 85 | 13.66 | 1074 | 14.8 | 18.0 |
| 4. Торцевая левая стенка | 13.8 | 92 | 14.07 | 1222 | 16.9 | 20.5 |
| 5. Свод | 27.4 | 50 | 11.50 | 345 | 9.5 | 11.5 |
| 6. Подина | 28.4 | 44 | 10.50 | 440 | 12.5 | 15.2 |
| Всего | 126.1 | - | - | - | 82.3 | 100 |

Примечание: Поверхности боковой передней стенки и подины определены с учетом выступающих частей кармана для выливки алюминия.

В соответствии с результатами экспериментальных измерений максимальные локальные значения температур наблюдались для всей левой торцевой стенки под форкамерой (окном) - 158°C и справа от окна - 138°C , а для правой торцевой стенки возле окон – 140 и 134°C . Такие высокие температуры по сравнению с другими элементами поверхностей могут быть следствием неплотностей между заслонками окон и стенками, и инфильтрации горячих дымовых газов из миксера, которые и нагревают близлежащие поверхности. Более 100°C имеют температуру и все поверхности заслонок, закрывающие окна. Наименьшие температуры характерны для нижних частей боковых стенок в районе подины, особенно в углах этих стенок.

Анализ данных табл. 1 показывает, что наибольшие теплотери характерны для торцевых стенок, далее по этому показателю располагаются боковые стенки, подина и свод.

Для обследованного миксера также был составлен энергетический баланс, конечной целью которого явилось определение расхода природного газа на горелки.

Уравнение энергетического баланса раздаточных миксеров имеет следующий вид

$$Q_{ал}^3 + Q_{вн} = Q_{фл} + Q_{ал}^B + Q_{п}^{нар} + Q_a \cdot 10^{-3} / \Delta\tau + Q_{п}^{ф.о} + Q_{п}^{отв} + Q_{инф}, \quad (1)$$

где $Q_{ал}^3$ - теплота, вносимая в миксер с заливаемым алюминием, кВт; $Q_{вн}$ - теплота, подводимая в миксере от продуктов сгорания природного газа, кВт; $Q_{фл}$ - затраты теплоты на плавление и нагрев флюса, кВт; $Q_{ал}^B$ - теплота, уносимая из миксера с выливаемым алюминием (снятие шлака и литье изделий), кВт; $Q_{п}^{нар}$ - потери теплоты через наружные ограждения, кВт; Q_a - количество теплоты, аккумулированное футеровкой, Дж; $\Delta\tau$ - время полного цикла литья, с; $Q_{п}^{ф.о}$ - потери теплоты через открытые форкамеры, кВт; $Q_{п}^{отв}$ - потери теплоты через отверстия, кВт; $Q_{инф}$ - затраты теплоты на нагрев инфильтрационного воздуха, засасываемого в рабочее пространство печи при открытии форкамер, кВт.

Если входящие в уравнение (1) составляющие потерь теплоты обозначить через

$$\sum Q_{п} = Q_{фл} + Q_{п}^{нар} + Q_a \cdot 10^{-3} / \Delta\tau + Q_{п}^{ф.о} + Q_{п}^{отв} + Q_{инф},$$

то полученное после этого уравнение энергобаланса можно использовать для определения необходимой мощности газовых горелок действующих миксеров, т.е.

$$Q_{вн} = Q_{ал}^B + \sum Q_{п} - Q_{ал}^3,$$

а затем - для определения расхода природного газа.

Исходные данные к расчету баланса

Технологические параметры (по результатам измерений): производительность миксера - $m_{ал} = 143$ т/сутки или 5958 кг/ч; продолжительность процесса заливки алюминия - $\tau_3 = 15$ мин/ч; продолжительность снятия шлака $\tau_{ш} = 20$ мин за смену или 2.5 мин / ч; время отстоя металла и литья слитков - $\tau_1 = 42.5$ мин / ч.

Количество открытых форкамер: при заливке металла - $N_{ф1} = 1$; при снятии шлака - $N_{ф2} = 1$.

Тепловые параметры (по результатам измерений): температура заливаемого алюминия - $t_{ал}^3 = 750^\circ\text{C}$; рабочая температура расплава в миксере - $t_p = 710^\circ\text{C}$; температура газов в районе форкамер - $t_{ф} = 850^\circ\text{C}$; температура воздуха в цехе - $t_{окр} = 5^\circ\text{C}$;

Конструктивные параметры: размеры форкамер (ширина - $a = 0.74$ м; высота - $b = 0.60$ м; толщина стенки в районе форкамер - $\delta_{ф} = 0.47$ м); отверстия в боковой передней стенке (количество - $N_o = 4$; диаметр отверстия - $d_o = 0.06$ м; толщина стенки в районе отверстия - $\delta_o = 0.49$ м).

Горелочные устройства: тип - ИГК - 25 у; количество - 4; топливо - природный газ - $Q_n^c = 33500$ кДж/м³; регулирование теплоподвода - отключением горелок автоматическое.

Расчеты баланса

Величину $Q_{\text{п}}^{\text{нар}}$ брали по результатам экспериментальных измерений из табл. 1; величины $Q_{\text{ал}}^3$ и $Q_{\text{ал}}^{\text{в}}$, $Q_{\text{п}}^{\text{ф.о}}$ (при заливке алюминия и снятии шлака) и $Q_{\text{п}}^{\text{отв}}$ определяли по методике [1], $Q_{\text{инф}}$ – по методике [4], а $Q_{\text{фл}}$ и $Q_{\text{а}}$ – по формулам (2) и (3), приведенным ниже. Все вычисляемые статьи баланса относили к 1 ч.

$$Q_{\text{фл}} = m_{\text{фл}} [r_{\text{фл}} + c_{\text{фл}}(t_{\text{р}} - t_{\text{пл}}^{\text{фл}})], \quad (2)$$

где $m_{\text{фл}}$ – массовый расход флюса (0.4 кг на 1 т расплава); $r_{\text{фл}}$ – теплота плавления флюса (356 кДж/кг); $c_{\text{фл}}$ – теплоемкость расплавленного флюса [0,84 кДж/(кг·К)]; $t_{\text{пл}}^{\text{фл}}$ – температура плавления флюса (455°C).

$$Q_{\text{а}} = 1.7725 \sqrt{\lambda_{\text{ст}} c_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} \tau' \tau''} \cdot \Delta t_{\text{ст}} F_{\text{ст}} / (\sqrt{\tau'} + \sqrt{\tau''}), \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$, $c_{\text{ст}}$, $\rho_{\text{ст}}$ – соответственно теплопроводность [Вт/(м·К)], теплоемкость [Дж/(кг·К)] и плотность [кг/м³] материала первого от внутренней поверхности слоя многослойной стенки; $\Delta t_{\text{ст}}$ – полное изменение температуры внутренней поверхности стенки за полупериод, °С; τ' и τ'' – условные продолжительности полупериодов нагрева и охлаждения, с; $F_{\text{ст}}$ – внутренняя поверхность стенки, находящаяся в контакте с расплавом, м².

Условные продолжительности полупериодов нагрева и охлаждения равны соответственно

$$\tau' = (\tau_1 + \tau_2) (\overline{\Delta t}_{\text{ст.нагр}} / \Delta t_{\text{ст}})^2;$$

$$\tau'' = \tau_3 (\overline{\Delta t}_{\text{ст.охл}} / \Delta t_{\text{ст}})^2,$$

где τ_1 , τ_2 , τ_3 – действительные продолжительности периодов соответственно нагрева, выдержки и охлаждения, с; $\overline{\Delta t}_{\text{ст.нагр}}$ и $\overline{\Delta t}_{\text{ст.охл}}$ – средние изменения температур внутренней поверхности стенки за периоды нагрева и охлаждения.

Среднее изменение температуры внутренней поверхности стенки за период нагрева

$$\overline{\Delta t}_{\text{ст.нагр}} = \overline{t}_{\text{ст.нагр}} - t_{\text{ст.нач}},$$

где $\overline{t}_{\text{ст.нагр}}$ – средняя температура стенки за период нагрева; $t_{\text{ст.нач}}$ – начальная температура стенки.

Средняя температура стенки за период нагрева определяется из выражения

$$\overline{t}_{\text{ст.нагр}} = (t_{\text{ст1}} \tau_1 + t_{\text{ст2}} \tau_2) / (\tau_1 + \tau_2)$$

Средняя температура стенки за период повышения температуры

$$\overline{t}_{\text{ст}} = t_{\text{нач}} + (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) / (n + 1),$$

где $t_{\text{кон}}$ – конечная температура стенки; n – параметр, принимаемый для периода нагрева равным 1, а для периода выдержки равным 0.

Тогда для периода нагрева

$$t_{\text{ст1}} = t_{\text{нач}} + 0.5(t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}); t_{\text{ст2}} = t_{\text{кон}}.$$

Среднее изменение температуры внутренней поверхности за период охлаждения

$$\overline{\Delta t}_{\text{ст.охл}} = \overline{t}_{\text{ст.охл}} - t_{\text{ст.нач}}.$$

Средняя температура стенки за период охлаждения

$$\overline{t}_{\text{ст.охл}} = t_{\text{кон}} + (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) / (n + 1)$$

Здесь параметр n принимали равным 0.25.

При выполнении расчетов Q_a приняты следующие исходные данные:

Внутренняя поверхность стенки, находящаяся в контакте с расплавом F_{cm}
 $= 27.8 \text{ м}^2$ (вычислена).

Свойства материала первого слоя (шамот марки А - $\delta_{ст} = 230 \text{ мм}$) при температуре 700°C : $\lambda_{ст} = 1.72 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – (пропитан металлом); $c_{ст} = 1020 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\rho_{ст} = 2000 \text{ кг/м}^3$.

Температуры стенки: $t_{нач} = 709^\circ\text{C}$; $t_{кон} = 749^\circ\text{C}$ (определены расчетом).

Продолжительности периодов: нагрева (заливки) - $\tau_1 = 900 \text{ с}$; выдержки (отстоя) - $\tau_2 = 1200 \text{ с}$; охлаждения (литья) - $\tau_3 = 1500 \text{ с}$.

Изменение температуры внутренней поверхности $\Delta t_{ст} = 40^\circ\text{C}$.

Результаты расчета баланса :

| | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Приход теплоты с заливаемым алюминием | $Q_{ал}^3 = 1936 \text{ кВт.}$ |
| 2. Расход теплоты с выливаемым алюминием | $Q_{ал}^B = 1832 \text{ кВт.}$ |
| 3. Потери (затраты) теплоты | $\Sigma Q_{п} = 135 \text{ кВт,}$ |
| в т. ч. - через наружные ограждения | $Q_{п}^{нар} = 82.3 \text{ кВт;}$ |
| - аккумуляция кладкой | $Q_a = 6.5 \text{ кВт;}$ |
| - через открытые окна (форкамеры) | $Q_{п}^{\phi.o} = 8.4 \text{ кВт;}$ |
| - через отверстия | $Q_{п}^o = 0.6 \text{ кВт;}$ |
| - плавление, нагрев флюса | $Q_{фл} = 0.4 \text{ кВт;}$ |
| - на нагрев инфильтрационного воздуха | $Q_{инф} = 36.8 \text{ кВт.}$ |

Из результатов расчетов видно, что величина $Q_{ал}^3 > Q_{ал}^B$, поэтому при заливке алюминия и доведения расплава до требуемой температуры горелочные устройства включать нет необходимости. Требуемая мощность горелочных устройств определяется необходимостью компенсации потерь теплоты при выливке алюминия, т.е $Q_{вн} = \Sigma Q_{п} = 135 \text{ кВт.}$

Необходимый расход природного газа на горение ($V_{г}$, $\text{м}^3/\text{ч}$) определяется из следующего балансового уравнения

$$Q_{вн} = \frac{V_{г} Q_{н}^c \eta_{ит}}{3600},$$

где $\eta_{ит}$ – коэффициент использования топлива, определяется по методике [1]; его расчетное значение равно 0.608.

Тогда $V_{г} = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$. По практическим данным расход газа на обследованный миксер в период проведения испытаний был равен $25 \text{ м}^3/\text{ч}$, т.е. невязка баланса составила около 4 %.

Анализ результатов расчета теплотерь показывает, что через наружные стенки миксера теряется 82.3 кВт теплоты, что составляет около 60 % от общих теплотерь.

С целью снижения потерь теплоты через наружные ограждения предложено в миксере измененной конструкции заменить асбест полностью и пенодиатомит частично или полностью на теплоизоляционные плиты из силиката кальция, теплопроводность которого в интервале $200 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$

изменяется от 0.06 до 0.1 Вт/(м·К). Для сравнения: теплопроводность диатомита в этом же интервале изменяется от 0.12 до 0.21 Вт/(м·К).

Соотношения между толщинами силиката кальция и предыдущего слоя ограждений для поверхностей, находящихся в расплаве, выбирались такими, чтобы обеспечить температуру на границе этого слоя с силикатом кальция не более 656°C и, соответственно, исключить пропитку силиката кальция расплавом алюминия. Так например, толщина силиката кальция в горизонтальной части подины выбрана равной 325 мм, а в наклонной – 510 мм; в боковых стенках – 115 мм; в своде – 113 мм и т. д.

По методике [1] с использованием специально разработанной программы были выполнены расчеты теплотерь через наружные ограждения миксеров существующей и измененной конструкции.

В результате сопоставления теоретических и действительных теплотерь для миксера существующей конструкции был вычислен коэффициент увеличения теплотерь [4], который использовали и для определения действительных теплотерь в миксере измененной конструкции.

Фактические теплотери через наружные ограждения миксера измененной конструкции составили 48.1 кВт, необходимая мощность горелочных устройств для компенсации потерь теплоты при выливке алюминия – 100.8 кВт, а расход природного газа на горение – $18 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В результате сопоставительных расчетов при применении теплоизоляции из силиката кальция вместо пенодиатомита годовая экономия природного газа составит около 50 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ на один миксер.

В миксере существующей конструкции, что будет иметь место и в модернизированном миксере, существенными являются потери теплоты с уходящими газами. При температуре газов, покидающих рабочее пространство, равной 850°C , коэффициент использования топлива составил $\eta_{\text{ит}} = 0.608$.

Для повышения коэффициента использования топлива теплоту уходящих дымовых газов необходимо утилизировать.

Одним из вариантов утилизации может быть использование теплообменника для подогрева дутьевого воздуха, подаваемого на горение, но это требует замены инжекционных горелок на горелки других типов.

Выполненные по известным соотношениям оценочные расчеты показали, что при требуемом расходе воздуха на горение около $240 \text{ м}^3/\text{ч}$ его можно нагреть от 5 до 660°C в трубчатом газовоздушном утилизаторе поверхностью нагрева 7 м^2 (теплопроизводительностью 44 кВт). При этом коэффициент использования топлива повышается до 0.84, а годовая экономия природного газа по этому показателю составит около 47 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ на один миксер.

Выводы

1. Экспериментально определены тепловые потери наружными ограждающими поверхностями литейного миксера с газовым нагревом емкостью 25 т, составляющие около 82 кВт.

2. В результате применения теплоизоляции из силиката кальция вместо пенодиатомита теплотери через наружные ограждения снижаются до 48 кВт, что приводит к годовой экономии природного газа около 50 тыс. м^3 на один миксер.

3. За счет использования теплоты уходящих из миксера дымовых газов для нагрева дутьевого воздуха в газоздушном теплоутилизаторе от 5 до 660 °С годовая экономия природного газа составит около 47 тыс. м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов Е.Н., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В. и др. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / под ред. Б. С. Громова. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 1998. – 256с.
2. Панов Е.Н., Боженко М.Ф., Даниленко С.В. и др. Изучение тепловых условий работы миксеров для приготовления и литья алюминиевых сплавов вместимостью 50 т // Цветные металлы. - 1995. - №1. - С. 43 – 45.
3. Панов Е.Н., Боженко М.Ф., Даниленко С.В. Энергетическая эффективность работы миксеров для алюминия // Цветные металлы. -2000. - №5. - С. 84–87.
4. Панов Е.Н., Боженко М.Ф., Коржик М.В. и др. Повышение энергетической эффективности печей (миксеров) для переплавки алюминиевого лома // Цветные металлы. - 2005. - №5 - 6. - С. 114–117.

Авторы:

Панов Е.Н.

Боженко М.Ф.

Васильченко Г.Н.

Даниленко С.В.

Билько В.В.

ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ

Рис.1. Упрощенная конструкция раздаточного миксера:

1 – торцевая левая стенка; 2 – форкамеры; 3 – свод; 4 – боковая задняя стенка; 5 – газоход; 6 – горелочные устройства; 7 – торцевая правая стенка; 8 – подина; 9 – карман для литья алюминия; 10 – боковая передняя стенка; А – заливка металла; Б – выливка металла; В – выход дымовых газов.

К статье Панова Е.Н., Боженко М.Ф. и др.

«Повышение энергетической эффективности газовых литейных миксеров вместимостью 25 т»

