

**В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук  
(ЗАО «Нефтегазстройизоляция», Украина),  
**С.М. КАБИШОВ**, канд. техн. наук,  
**И.А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук,  
**П.Э. РАТНИКОВ**, канд. техн. наук,  
**Д.В. МЕНДЕЛЕВ**, канд. техн. наук  
**П.Ю. ЦЫКУНОВ** (БНТУ)

## **СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ И ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ ТВЧ\***

В условиях машиностроительных предприятий при выборе способа нагрева заготовок перед пластической деформацией либо под термообработку возможны два варианта: использование газопламенных либо электрических нагревательных устройств. Они отличаются по конструкции, величине капитальных и эксплуатационных затрат, физическим принципам нагрева и т.д. Но при оценке энергоэффективности каждый из способов нагрева должен оцениваться, прежде всего, с точки зрения энергозатрат на реализацию технологического процесса.

В соответствии с рекомендациями Департамента по энергоэффективности Госстандарта Республики Беларусь коэффициент пересчета электрической энергии в условное топливо (количество условного топлива, необходимого для полезного отпуска потребителю единицы электроэнергии от источника энергоснабжения) принимают  $K_e = 0,28$  т у.т./тыс. кВт·ч (кг у.т./кВт·ч). Аналогичный показатель для природного газа составляет  $K_g = 1,15$  т у.т./тыс. м<sup>3</sup> (кг у.т./м<sup>3</sup>). В соответствии с приведенными коэффициентами 1 м<sup>3</sup> природного газа эквивалентен  $1,15/0,28 = 4,11$  кВт·ч. Согласно рекомендациям Департамента по энергоэффективности Республики Беларусь, при выполнении оценки энергосберегающих мероприятий стоимость условного топлива принимается в размере 215 долл. США/т у.т.

Рассмотрим процесс нагрева металла в газовой печи и индукционном нагревателе до температуры 1200 °С. При нагреве заготовок из углеродистой стали в печи производительностью 1000 кг/ч от 0 °С до 1200 °С металл поглощает около 845 МДж/т. Примем, что

КПД установки индукционного нагрева  $\eta_{и.н} = 70 \%$ . Тогда затраты электроэнергии на нагрев 1 т металла составят

$$W_{и.н} = \frac{845}{3,6\eta_{и.н}} = 335,32 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т} = 93,24 \text{ кг у.т/т.}$$

Средний уровень КПД газопламенных печей в большинстве случаев составляет 10–15 % (без учета затрат топлива на разогрев печи и во время простоев, в действительности средний КПД ниже). Следовательно, расход природного газа с теплотворной способностью 34,5 МДж/м<sup>3</sup> в печи с  $\eta = 12 \%$  составит:

$$V_{г.н} = \frac{845}{34,5\eta_{г.н}} = 204,1 \text{ м}^3/\text{т} = 240,33 \text{ кг у.т/т.}$$

Затраты с учетом принятой цены условного топлива при использовании индукционного нагрева составят:

$$S_{и.н} = \frac{93,24 \cdot 215}{1000} = 20,05 \text{ долл. США/т.}$$

Применение газопламенной печи приводит к удельным затратам в размере:

$$S_{г.н} = \frac{240,33 \cdot 215}{1000} = 51,67 \text{ долл. США/т.}$$

Таким образом, для того, чтобы в данном случае газовый нагрев с точки зрения энергоэффективности стал конкурентоспособным с индукционным, следует увеличить КПД газовой печи в  $51,67/20,05 = 2,58$  раза, то есть до 30,93 %.

Рассмотрим эту же задачу, но с учетом существующих тарифов на природный газ и потребленную электроэнергию (в долларовом эквиваленте), которые применялись при расчетах с энергопоставляющими организациями в I квартале 2013 г. на ОАО «Минский автомобильный завод»: 272 долл. США за 1000 м<sup>3</sup> природного газа и 111,4 долл. США за 1000 кВт·ч.

Помимо этого, следует учесть, что предприятия с установленной мощностью оборудования более 750 кВт·А оплачивают электроэнергию по двухставочному тарифу – за потребленную электроэнергию и заявленную мощность. Вторая часть оплаты перечисляется энер-

госнабжающей организации ежемесячно. Для того, чтобы оценить данные затраты будем считать, что годовой фонд рабочего времени нагревателя составляет около 6000 ч, а объем производства при производительности 1 т/ч, соответственно, 6000 т/год.

Тогда при использовании индукционной нагревательной установки, о которой речь шла выше, дополнительные затраты с учетом тарифа за заявленную мощность 12,95 долл. США/кВт составят:

$$S_{и.н} (N) = \frac{12,95 \cdot 335,32 \cdot 12}{6000} = 8,68 \text{ долл. США/т.}$$

За потребленную электроэнергию:

$$S_{и.н} = \frac{335,32 \cdot 111,4}{1000} = 37,35 \text{ долл. США/т.}$$

Следовательно, общие затраты при использовании индукционного нагревателя будут равны:

$$S_{и.н} + S_{и.н} (N) = 37,35 + 8,68 = 46,03 \text{ долл. США/т.}$$

Затраты при использовании газового нагрева составят:

$$S_{г.н} = \frac{204,1 \cdot 272}{1000} = 55,52 \text{ долл. США/т.}$$

Таким образом, при существующих ценах на энергоресурсы газовая нагревательная печь сможет конкурировать с индукционным нагревателем уже при КПД

$$12 \cdot (55,52 / 46,03) = 14,5 \%$$

Очевидно, что стоимость электроэнергии существенно завышена (если оценить отношение КПД печи в первом и во втором вариантах, то приблизительно в 2,13 раза) и не соответствует реальной величине энергозатрат на ее производство. Фактически полученный результат показывает, что предприятия оплачивают значительную часть стоимости электроэнергии, потребляемой не на производственные нужды, то есть населением, для освещения городских улиц и т.п. Если постепенно доля оплаты коммунальных услуг населением будет возрастать, а эффективность работы энергосистемы республики повысится (уменьшатся накладные расходы, на рынке

электроэнергии появятся конкурирующие энергоснабжающие организации, активнее будут использоваться автономные источники электроснабжения, такие, как газопоршневые установки, микротурбины и т.п., обеспечивающие снижение себестоимости электроэнергии практически в 2 раза), то конкурентоспособность электронагрева по сравнению с газовым также повысится.

Тем не менее, это не говорит о том, что в перспективе электронагрев сумеет заменить газовый. Если рассмотреть теоретическую задачу, в которой источником электроэнергии будет генерирующая установка с КПД  $\eta_g$ , (например, когенерационная установка), то выбор между газовым и электрическим нагревательным устройством с точки зрения использования первичного источника энергии (природного газа), можно осуществить на основе соотношения:

$$\eta_{и.н} \cdot \eta_g = \eta_{г.н.}$$

Например, при изменении  $\eta_g$  от 30 до 60 % КПД газопламенной печи, способной конкурировать по уровню энергозатрат с индукционным нагревателем ( $\eta_{и.н} = 70 \%$ ), необходимо будет увеличить от 21 до 42 % (рисунок 1).

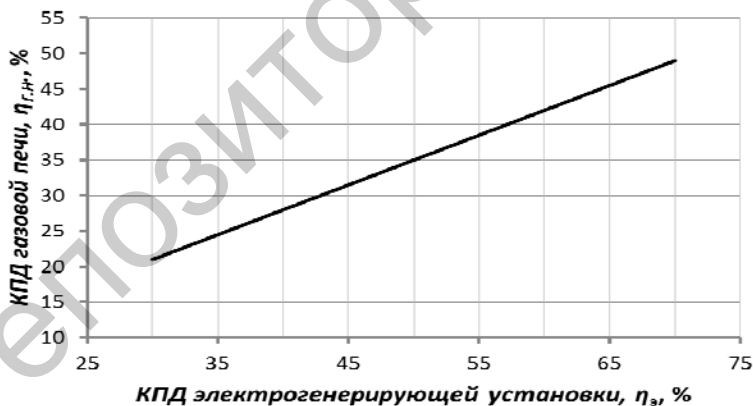


Рисунок 1 – Изменение уровня КПД газовой печи, способной конкурировать по уровню энергозатрат с индукционным нагревателем ( $\eta_{и.н} = 70 \%$ ), при использовании электрогенерирующих установок с различным КПД

Современный уровень КПД электрогенерирующих установок в Беларуси, если руководствоваться тем, что количество условного топлива, необходимого для полезного отпуска потребителю единицы электроэнергии от источника энергоснабжения равно 0,28 т у.т./тыс. кВт·ч, составляет в среднем по энергосистеме 44 %. Тогда для того, чтобы использовать газовый нагрев взамен индукционного, новая газопламенная печь должна иметь КПД не менее 31 % (рисунок 1). То есть результат фактически совпадает с тем, который был получен при оценке КПД в соответствии с рекомендациями Департамента по энергоэффективности РБ. Такой уровень вполне достижим при использовании современных футеровочных материалов, газогорелочных устройств и системы АСУ ТП. В то же время существенно повысить КПД электрогенерирующих установок довольно сложно.

Полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы:

1. При выборе способа нагрева (строительстве новой печи) либо оценке целесообразности модернизации газопламенной печи следует выполнить предварительный расчет эффективности данного вида нагрева по сравнению с электрическими установками. С точки зрения энергоэффективности применение газового нагрева целесообразно лишь в том случае, если КПД пламенной печи превышает некое пороговое значение (определяется в соответствии с одним из приведенных выше вариантов в зависимости от конкретных условий и действующих тарифов на энергоносители).

2. Помимо показателей энергоэффективности необходимо оценивать различные варианты нагрева с точки зрения технологических преимуществ (возможности автоматизации, потерь металла с окалиной, условия труда обслуживающего персонала и т.д.). В данном отношении индукционный нагрев обладает явными преимуществами по сравнению с газовым.

Например, при существующем соотношении цен на природный газ и электроэнергию концевой нагрев заготовок перед ковкой в индукционном нагревателе является экономически обоснованным и выгодным для потребителя по сравнению с газовым. Это объясняется особенностями конструкции газовой печи для концевой заготовки (большое количество технологических отверстий со стороны посадки заготовок), которые приводят к выбиванию продуктов сгорания из рабочего пространства и значительным подсосам холодно-

го воздуха. Как следствие, КПД на уровне 20–30 практически не достижим. В то же время, применение современной проходной (методической либо полуметодической) печи для нагрева заготовок перед ковкой-штамповкой вполне оправдано, так как в таком агрегате КПД 40–50 % реален.

3. В процессе расчетов следует учитывать, что применение рекомендаций Департамента по энергоэффективности Республики Беларусь относительно стоимости условного топлива приводят к некорректным результатам и завышению эффективности электронагрева. При выполнении обоснования энергосберегающих мероприятий более корректно использовать действующие тарифы на энергоресурсы. Допустима и необходима лишь сравнительная оценка энергопотребления при переводе различных источников энергии в условное топливо, а также сопоставление капитальных и эксплуатационных затрат.

*УДК 669.71/531.262*

**Г.А. РУМЯНЦЕВА**, канд. техн. наук,  
**Б.М. НЕМЕНЕНОК**, д-р техн. наук,  
**Е.А. ВОЛЬСКИЙ**,  
**И.А. ГОРБЕЛЬ** (БНТУ)

## **ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ФУТЕРОВКИ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Анализ работы плавильных печей цехов и участков алюминиевого литья показал, что срок службы футеровки во многом зависит от типа, назначения, емкости печи, марок выплавляемых сплавов, режима работы печи, вида шихты и способа ее загрузки.

Футеровка печей в процессе эксплуатации подвергается воздействию многих разрушающих факторов, среди которых необходимо выделить следующие:

1) Механическое воздействие на футеровку ударов шихты в ходе ее загрузки и инструмента в процессе чистки стен и пода от шлаковых наростов и настывлей. В меньшей степени механическое воздействие проявляется от потоков движущегося расплава.