

Вице-президент НП Консорциум «Русская сталь» [Electronic resource]. – Mode of access: www.russtal.ru/files/PresentationKSPP.pdf.

18. Агапова, О. В ОАО «Уральская кузница» успешно завершён основной этап отработки технологии изготовления цельнокатаных колец [Electronic resource]. – Mode of access: www.chelindustry.ru.

УДК 669.04

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ С ТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ ПЕЧЕЙ ЗАКАЛОЧНО-ОТПУСКНЫХ АГРЕГАТОВ

Выбор конструкции печи предполагает анализ технологичности изготовления печи и последующего обслуживания и факторов, обеспечивающих необходимые характеристики процесса нагрева. Тип печи определяется производительностью, периодичностью ее работы, а также графиком нагрева и видом садки.

Для закалочного-отпускного агрегата характерна сквозная технология, т.е. заготовки после нагрева под закалку и охлаждения в закалочном баке автоматически поступают в отпускную печь. При этом способ перемещения заготовок (деталей) в данных печах определяется их формой и размерами. В этой связи наибольшее распространение получили агрегаты с толкательным и конвейерным приводом перемещения заготовок в печи. При возможности применения обоих типов перемещения предпочтение следует отдавать такому, который обеспечивает лучшие показатели работы, т.е. учитывать тепловые потери с устройствами перемещения (конвейерной лентой, поддонами и корзинами, роликами), удобство обслуживания и ремонта, надежность, занимаемую площадь и др. Наилучшим вариантом транспортирующих устройств в отношении тепловых потерь обладает толкательный способ перемещения заготовок по ручьям в подине, но данный способ не является универсальным, так как заготовки должны иметь цилиндрическую форму и определенные размеры.

Учитывая то, что значительное распространение получили конвейерные печи, проанализируем долю теплоты, теряемой с охлаждением конвейерной ленты во время обратного хода. Исходными данными для расчета является: масса конвейерной ленты 2000 кг, конечная температура металла $t_{\text{э}} = 870 \text{ }^\circ\text{C}$; температура воздуха $t_{\text{в}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; производительность $P = 1,2 \text{ т/ч}$; коэффициент заполнения ленты $K_{\text{зап}} = 0,5$.

В таблице 1 приведен тепловой баланс нагревательной печи ЗОА № 5 ОАО «БЕЛКАРД».

Таблица 1 – Тепловой баланс нагревательной печи конвейерного типа

Статья	Приход, Вт	%	Статья	Расход, Вт	%
От сжигания топлива $Q_{\text{т}}$	546058,2	97,1	На нагрев металла $Q_{\text{м}}$	192030,9	34,2
С подогретым воздухом $Q_{\text{в}}$	11057,7	2,0	На нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$	64236,6	11,4
Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$	5018,0	0,9	С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$	234142,0	41,7
			Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$	41358,6	7,4
			Потери излучением $Q_{\text{изл}}$	30365,9	5,4
Итого	562133,9	100	Итого	562133,9	100

Расход природного газа составил $V = 0,0156 \text{ м}^3/\text{с} = 56,2 \text{ м}^3/\text{ч} = 46,8 \text{ м}^3/\text{т}$.

Из таблицы 1 следует, что на нагрев конвейерной ленты теряется 11,4 % теплоты. При увеличении или уменьшении производительности доля этой составляющей будет изменяться.

Сравнительный анализ результатов расчета свидетельствует о том, что влияние производительности на расход топлива довольно существенное и составляет в сравнении с производительностью 1,2 т/ч (с такой производительностью агрегат работает самое продолжительное время):

– для $P = 0,9 \text{ т/ч}$ превышение расхода $\Pi = 50,27 - 46,8 = 3,47 \text{ м}^3/\text{т}$ или $\Pi_1 = 7,4 \text{ } \%$;

– для $P = 1,4$ т/ч экономия газа составит $\Theta = 46,8 - 45,32 = 1,48$ м³/т или $\Theta_1 = 3,2$ %.

При повышении производительности за счет увеличения скорости движения конвейерной ленты при постоянном коэффициенте заполнения ленты (для приведенного случая $K_{\text{зап}} = 0,5$ означает, что площадь, занимаемая металлом на ленте, составляет 50 % всей площади ленты) несколько увеличивается теплота, теряемая при охлаждении конвейерной ленты при обратном ходе через нижнюю камеру печи.

В случае производительности 0,9 т/ч теплота, теряемая лентой, составляет 10,6 % расходной части, а в случае производительности 1,4 т/ч – 11,8 %.

Снижению потерь тепловой энергии на транспортные устройства и, в частности, теряемых конвейерной лентой, может способствовать увеличение заполнения ленты деталями, а также расположение их в 2 или 3 слоя при условии небольших диаметров деталей и обеспечения равномерности прогрева.

В качестве основного варианта для расчетов принят коэффициент заполнения ленты деталями $K_{\text{зап}} = 0,5$. Коэффициент заполнения ленты $K_{\text{зап}} = 1$ означает заполнение деталями всей площади ленты, а $K_{\text{зап}} = 1,5$ – 1/3 часть от всего количества деталей располагается вторым слоем.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что доля теплоты, затраченной на нагрев конвейерной ленты, в случае увеличения коэффициента заполнения будет уменьшаться:

- для $K_{\text{зап}} = 0,5$ $Q_{\text{лент}} = 11,4$ %, $Q_{\text{м}} = 34,2$ %;
- для $K_{\text{зап}} = 1$ $Q_{\text{лент}} = 6,3$ %, $Q_{\text{м}} = 37,9$ %;
- для $K_{\text{зап}} = 1,5$ $Q_{\text{лент}} = 4,4$ %, $Q_{\text{м}} = 39,3$ %.

При удалении продуктов сгорания через нижнюю камеру печи, в которой лента совершает обратный ход, и ее герметизации можно обеспечить незначительные потери теплоты на протяжении всего хода ленты и разогрев продуктами сгорания в первой зоне нижней камеры печи.

Для сравнения эффективности нагревательной печи с различными системами транспортирования заготовок рассчитан тепловой баланс агрегата нормализации толкательного типа APN-1800G,

установленного на РУП «МАЗ». Для него характерны следующие параметры транспортирующих элементов: масса корзины $m_{\text{к}} = 80$ кг; масса поддона $m_{\text{п}} = 129,5$ кг; масса деталей $m_{\text{д}} = 500$ кг; конечная температура нагрева $t_{\text{к}} = 870$ °С; производительность печи $P = 1800$ кг/ч; количество корзин – 11 шт.; время нахождения одного поддона в печи 3 ч; темп выдачи – 16 мин. Форма и размер деталей – ступенчатый цилиндр, диаметр 20–40 мм, расположение в корзине насыпью в 2-4 слоя. Габаритные размеры нагревательной печи 9400×3100×1400 мм.

Результаты расчета теплового баланса нагревательной печи агрегата нормализации с рекуперативными горелками представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Тепловой баланс нагревательной печи агрегата нормализации толкательного типа с рекуперативными горелками, установленной на РУП «МАЗ»

Приход теплоты	Значение	%	Расход теплоты	Значение	%
От сжигания топлива $Q_{\text{г}}$	594953,3	80,7	На нагрев металла $Q_{\text{м}}$	317187,5	43,0
С подогретым воздухом $Q_{\text{в}}$	142549,6	19,3	На нагрев транспортных устройств $Q_{\text{тр}}$	133218,8	18,1
			С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$	248452,5	33,7
			Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$	34986	4,7
			Потери излучением $Q_{\text{изл}}$	3658,1	0,5
Итого	737502,9	100	Итого	737502,9	100

Расход природного газа для указанных условий составил $B = 0,017$ м³/с или 61 м³/ч. С учетом того, что производительность печи составляет 1,8 т/ч, удельный расход природного газа составит $B = 33,9$ м³/т. Коэффициент полезного действия (КПД), определенный по теплоте, затраченной на нагрев деталей при использовании рекуперативных горелок, равен 43 %. Теплота, теряемая с поддонами и корзинами, составляет 18 %.

В случае агрегата нормализации теплота поддонов используется в дальнейшем для замедленного охлаждения, поэтому ее можно включить в полезную теплоту. В случае использования закалочных отпускных агрегатов теплота транспортирующих устройств теряется.

Таким образом, расчет тепловых балансов показывает, что использование для транспортирования деталей в печах различных механизмов и вспомогательных устройств приводит к потерям теплоты с транспортными устройствами. Рассмотрим основные закономерности тепловых процессов при использовании транспортных устройств с целью минимизации тепловых потерь на технологический процесс.

Определение температурных полей связано с решением дифференциального уравнения теплопроводности, которое устанавливает зависимость между температурой, временем и координатами элементарного объема.

Для трехмерной модели нагрева или охлаждения уравнение теплопроводности запишется следующим образом:

$$\rho_j(T)c_{pj}(T)\frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{xj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{yj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{zj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial z}\right) + q_{vj},$$

где j – индекс рассматриваемого материала (заготовка, футеровка и др.); ρ_j – плотность материала; c_{pj} – изобарная теплоемкость материала; T_j – температура; τ – время; x, y, z – координаты; $\lambda_{xj}, \lambda_{yj}, \lambda_{zj}$ – теплопроводность; q_{vj} – объемная плотность внутренних источников или стоков теплоты.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности необходимо установить распределение температуры внутри тела в начальный момент времени и закон взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела.

На практике в подавляющем большинстве случаев достаточно задавать равномерное распределение температуры внутри тела в начальный момент времени, т.е.

$$T_j(x, y, z, 0) = T_{0j} = \text{const}.$$

При моделировании нагрева заготовок в печах используют граничное условие 3-го рода. В ряде случаев для части поверхности заготовки используют условие контакта с подом печи.

Граничное условие третьего рода задает либо закон конвективного, либо радиационного, либо суммарного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Например, граничное условие третьего рода при упрощенном варианте моделирования можно записать в следующем виде:

$$-\lambda_j(T) \frac{\partial T_j(\tau)}{\partial \bar{n}} = \alpha_j(T) (T_c - T_{ij}(\tau)),$$

где $T_{ij}(\tau)$ – температура поверхности металла; T_c – температура печной среды (печи).

В случае конвективного теплообмена $\alpha_j = \alpha_{kj}$ – коэффициент конвективного теплообмена; в случае радиационного теплообмена $\alpha_j = \alpha_{\delta j} = \varepsilon \sigma \left((T_{ij}^2(\tau) + T_c^2) \cdot (T_{ij}(\tau) + T_n) \right)$; в случае суммарного теплообмена $\alpha_j = \alpha_{kj} + \alpha_{rj}$;

В качестве исходных данных используем двумерную геометрию с толщиной поддона 50 мм. Теплофизические свойства принимаем аналогичными армко-железу. На верхней и боковых гранях задаем условие радиационного теплообмена с окружающей средой; температуру среды принимаем равной 20 °С; начальную температуру поддона на выходе из нагревательной печи – равной конечной температуре металла, т.е. 1000 °С; степень черноты металла – 0,85. Помимо радиационного теплообмена, задаем условие свободной конвекции для горизонтальной поверхности (сверху) и вертикальной поверхности (на боковых границах).

На рисунке 1 представлено температурное поле в сечении поддона при охлаждении его на воздухе в течение 2 ч.

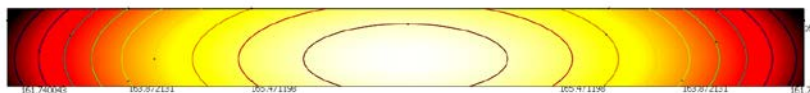


Рисунок 1 – Температурное поле в сечении поддона (толщина 50 мм) при охлаждении на воздухе в течение 2 ч

На рисунке 2 представлены температуры по сечению поддона при охлаждении на воздухе, построенные с интервалом в 500 с, а на рисунке 3 – изменение температур в трех различных точках сечения с течением времени.

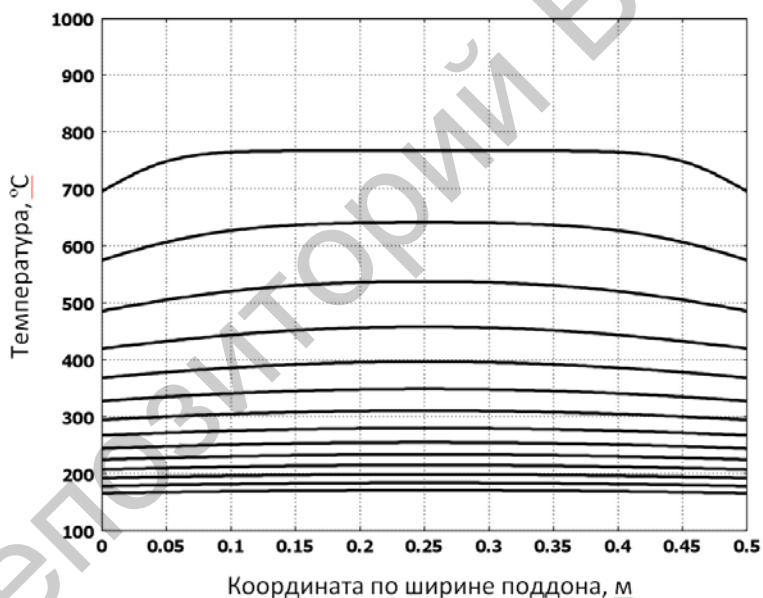


Рисунок 2 – Поле температур по сечению поддона при охлаждении на воздухе в течение 2 ч (с интервалом в 500 с)

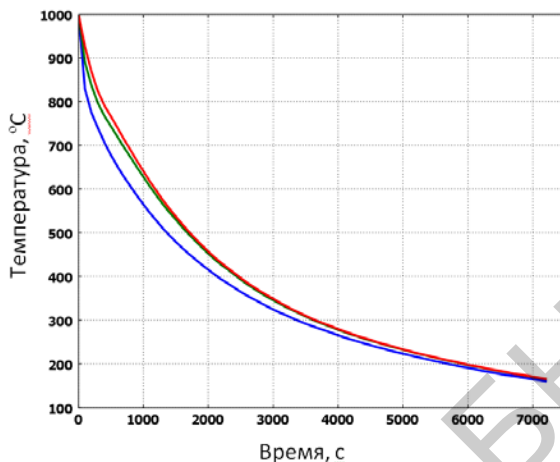


Рисунок 3 – График температур в трех точках по сечению поддона при охлаждении на воздухе в течение 2 ч

В реальных условиях поддоны перемещаются по роликам, поэтому рассмотрим также условие контакта поддонов с холодным металлом на нижней границе (граничное условие 4 рода). На рисунках 4 и 5 представлены результаты расчета температур в сечении поддона при наличии контакта нижней поверхности с роликами.

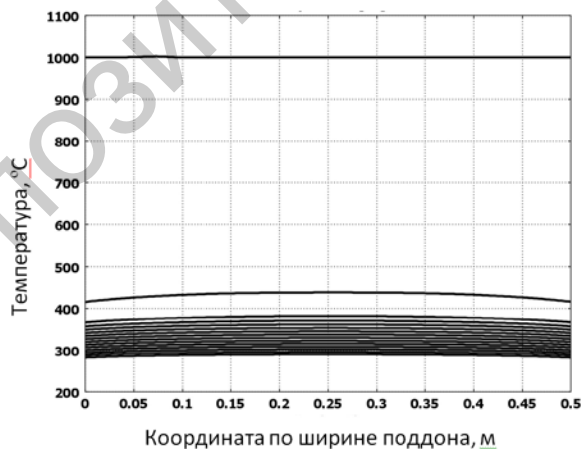


Рисунок 4 – Поле температур по сечению поддона при охлаждении в течение 2 ч (с интервалом в 500 с при наличии контакта с роликами на нижней границе)

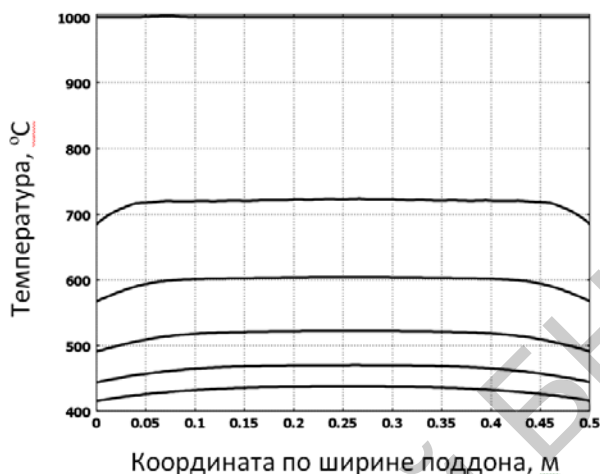


Рисунок 5 – Поле температур по сечению поддона при охлаждении в течение 500 с (с интервалом в 100 с при наличии контакта с роликами на нижней границе)

Как следует из результатов расчета, в случае контакта поддона с поверхностью с высоким значением коэффициента теплопроводности охлаждение поддона происходит с большой интенсивностью.

Анализируя результаты моделирования процесса охлаждения поддона и условия работы различных закалочных агрегатов, можно отметить, что при возврате поддона без погружения его в закалочную ванну можно частично сохранить теплоту только при условии кратковременного контакта с металлическими роликами возвратного устройства и тем самым обеспечить экономию топлива. При этом после возврата на исходную позицию поддон следует устанавливать на поверхность с низким значением коэффициента теплопроводности (керамическую).

Таким образом, результаты исследований показывают преимущества транспортирования заготовок при использовании конвейерного способа.