

УДК 621.3.036

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК НА ОБЩЕЕ ВРЕМЯ ПРЕБЫВАНИЯ САДКИ В ПЕЧИ И КАЧЕСТВО НАГРЕВА

Асп. КОВАЛЕВ С. С.

Белорусский национальный технический университет

Как правило, интенсификация теплообмена в нагревательных печах выполняется за счет лучистой составляющей теплообмена. С этой целью подбирается футеровка с высокой степенью черноты (панельные горелки) или горелки, разогревающие такую футеровку до высокой температуры (горелки с плоским пламенем, к примеру типа ГПП). В таких случаях расчетная температура печи достигает величины порядка 1500–1550 °С, интенсифицируя тем самым лучистую составляющую коэффициента теплоотдачи до 450–500 Вт/(м²·К).

При нагревании низколегированной стали (например, 08КП) и условия, что в зоне выдержки не наблюдается ее перегрев, сокращается время пребывания садки в печи и, как следствие, происходит сокращение энергозатрат в теплотехнологияхковки, штамповки. Совершенно иная картина должна наблюдаться при нагревании легированных и высокоуглеродистых сталей (рис. 1).

Выполним сравнительный анализ эффективности нагревания низко(08КП и Ст20) и высокоуглеродистых, а также легированных сталей (к примеру, 1Х18Н9Т) при больших значениях коэффициента теплоотдачи к поверхности садки.

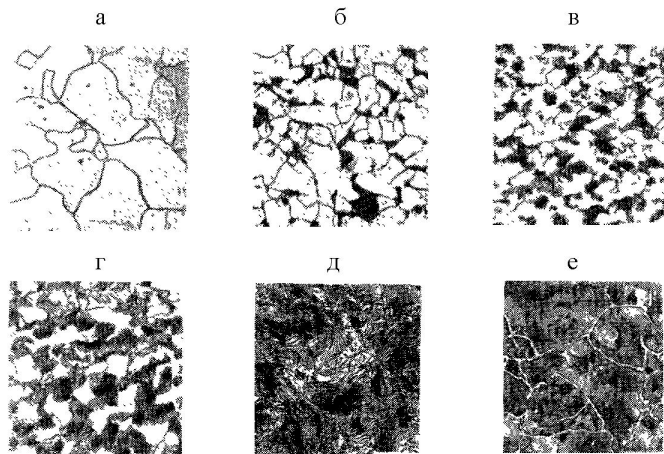


Рис. 1. Структура сталей с различным содержанием углерода ($\times 200$) [1]: \square – феррит, \blacksquare – перлит; а-е – соответственно содержание углерода – 0,04; 0,20; 0,30; 0,50; 0,80 и 1,2 %

Малоуглеродистые стали с содержанием углерода менее 0,3 % (рис. 2) обладают достаточно высокими тепло- и температуропроводностью в сравнении с высокоуглеродистыми и легированными (практически во всем диапазоне температур). Серьезное различие величины коэффициента температуропроводности этих сталей дает основание ожидать различного по величине времени выдержки при нагревании садки в печи (зона выдержки нагревательного устройства).

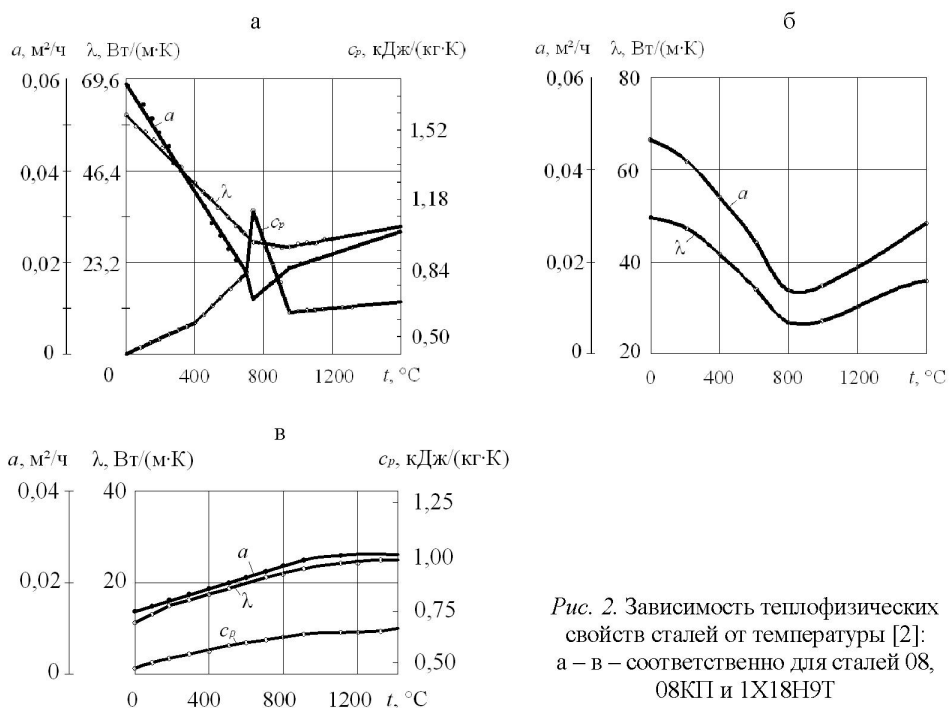


Рис. 2. Зависимость теплофизических свойств сталей от температуры [2]: а – в – соответственно для сталей 08, 08КП и 1Х18Н9Т

Ниже анализ будет выполнен для стальной заготовки (08КП и 1Х18Н9Т), нагреваемой в обычном (при температуре печи 1350 $^\circ\text{C}$) и ускоренном ($t_{\text{печ}} = 1500\text{--}1550$ $^\circ\text{C}$) режимах размерами 120 \times 140 \times 1800 мм (плотный посад).

Такой посад при симметричном нагреве может рассматриваться как тело классической формы, так как поток теплоты между отдельными заготовками отсутствует. Это дает основание считать, что условие $\delta/x_{\min} < 0,1$ выполняется ($0,12/1,8 < 0,1$). Последнее позволяет существенно упростить механизм расчета величины суммарного времени пребывания садки в печи (одномерная нестационарная теплопроводность при переменных теплофизических характеристиках). Будем считать, что нагревание происходит при граничных условиях 3-го рода. В итоге будет оцениваться общее время нагревания заготовок.

В пластине поток направлен по нормали к ее поверхности (всего один поток в направлении оси X) q_x . В цилиндре и шаре поток q_r при нагревании направлен по радиусу R к центру этих тел. Других потоков теплоты в этих телах нет. Совершенно очевидно, что и температурные поля в телах классической формы одномерны. Однако эти поля существенно отличаются по величине и форме от одномерных задач с постоянными теплофизическими параметрами.

Задача о нагревании (охлаждении) при необходимости подразделяется на две составляющие:

- внешняя – это приток теплоты к наружной поверхности нагреваемого твердого тела путем теплового излучения и конвекции;
- внутренняя – поступление теплоты от наружной поверхности вглубь твердого тела теплопроводностью.

Обе составляющие общего процесса нагревания (охлаждения) жестко связаны между собой граничными условиями.

Следует помнить, что существует много способов решения задач, связанных с температурным полем в твердом теле (нестационарное поле температур), однако все эти способы без исключения позволяют получить лишь приближенное решение. В реальной обстановке нагревания, как правило, теплофизические характеристики с изменением температуры тела сами изменяются, что вносит существенную коррекцию в общий процесс.

С целью оценки времени (граничное условие 3-го рода) рассмотрим замкнутую систему уравнений для нагреваемых изделий (пластины, цилиндра) в случае, когда теплофизические характеристики c_p и λ (удельная теплоемкость и теплопроводность) материала заданы как функции температуры, т. е. в ходе нагрева изменяются во времени и пространстве. Что касается плотности тела ρ , которая здесь не упоминается, то она с ростом температуры меняется незначительно и поэтому (для упрощения задачи) не учитывается и принимается постоянной $\rho(T) = \text{const}$ в процессе нагревания (охлаждения).

Для пластины (плиты) толщиной $2S$ ($2X$) симметричный нагрев (начало координаты $x = 0$ размещено в средней плоскости плиты):

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right],$$

при $x = \pm S$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \sigma (T_r^4 - T_{\text{пов}}^4) + \alpha (T_r - T_{\text{пов}}); \quad (1)$$

при $x = 0$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0;$$

при $t = 0$

$$T(x, 0) = T_0(x).$$

В пределах каждого элементарного слоя дифференциальное уравнение теплопроводности заменяется конечно-разностным уравнением, которое может быть получено двумя способами.

При первом способе составляется уравнение теплового баланса для элементарного слоя. Например, для плоского слоя k можно записать следующее уравнение:

$$q_1 + q_2 = q_c, \quad (2)$$

$$\text{где } q_1 = \frac{\lambda_a}{\Delta x} (T_{k+1,t} - T_{k,t}) \Delta t; \quad q_2 = \frac{\lambda_6}{\Delta x} (T_{k-1,t} - T_{k,t}) \Delta t; \quad q_c = c_{k,t} \rho \Delta x (T_{k,t+\Delta t} - T_{k,t}).$$

Подставляя выражения для q_1 , q_2 , q_c в уравнение (2) и полагая $\lambda_a = \frac{1}{2}(\lambda_{k,t} + \lambda_{k+1,t})$; $\lambda_6 = \frac{1}{2}(\lambda_{k,t} + \lambda_{k-1,t})$, получаем конечно-разностное уравнение

$$T_{k,t+\Delta t} = T_{k,t} + \left(\frac{\lambda}{c\rho} \right)_{k,t} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left[\frac{\lambda_{k+1,t} + \lambda_{k,t}}{2\lambda_{k,t}} (T_{k+1,t} - T_{k,t}) + \frac{\lambda_{k-1,t} + \lambda_{k,t}}{2\lambda_{k,t}} (T_{k-1,t} - T_{k,t}) \right]. \quad (3)$$

Задачу (1) упрощаем, так как выполняется сравнение, а не находится абсолютная величина, и рассматриваем ту же пластину, но при условии, что $\lambda = \text{const}$ и $c_p = \text{const}$ в процессе нагревания [3].

Таким образом, неограниченная пластина представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями. Изменение температуры происходит только в одном направлении x , в двух других направлениях y и z температура неизменна $\left(\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \right)$. Следовательно, задача является одномерной.

Записываем дифференциальное уравнение для симметричной пластины

$$\left(\frac{\delta}{x_{\min}} \leq 0, 1 \right)$$

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0; \quad -X < x < X, \quad (4)$$

где X – расстояние от оси пластины в направлении потока теплоты; x – текущая координата в направлении потока.

Для всех граничных условий устанавливаем однозначность решения (4).

Для пластины толщиной $2X$ задано начальное распределение температуры функцией (граничное условие 3-го рода)

$$t(x, 0) = f(x).$$

В начальный момент времени пластина помещается в среду с постоянной температурой $t_c > t(x, 0)$. Между ограничивающими поверхностями пластины и окружающей средой происходит теплообмен по закону Ньютона. Требуется найти распределение температуры по толщине пластины при ее симметричном нагревании. Имеем:

$$\begin{aligned} t(x, 0) &= f(x); \\ -\lambda \frac{\partial t(X, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(X, \tau)] &= 0; \\ \lambda \frac{\partial t(-X, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(-X, \tau)] &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Модель симметричного нагрева пластины совместно с (5) можно представить:

$$\begin{cases} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} & (\tau > 0; -X < x < X); \\ t(x, 0) = f(x); \\ -\lambda \frac{\partial t(X, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(X, \tau)] = 0; \\ \lambda \frac{\partial t(-X, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(-X, \tau)] = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы (6) выполняется методом разделения переменных

$$\frac{t(x, \tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{X} \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (7)$$

Как уже отмечалось, интенсификация нагрева выполняется за счет повышения температуры печи $t_{\text{печ}}$. Если в обычном режиме она составляет 1350 °С при $\alpha_{\text{эф}} \approx 370$ Вт/(м²·К), то в форсированном эта величина будет 1500–1550 °С при $\alpha_{\text{эф}} \approx 500$ Вт/(м²·К).

Для расчета принимаем: $\lambda^{08\text{КП}} \approx 28$; $\lambda^{1\text{X}18\text{Н9Т}} \approx 10$ Вт/(м·К). Нагрев выполняется в полуметодической печи, имеющей зоны выдержки и основного нагрева. В полуметодических печах (теплотехнологии нагрева под ковку, штамповку и прокатку) основной нагрев выполняется в одной зоне.

Итак, используя (7) для стали 08КП, имеем:

- при $t_{\text{печ}} \approx 1350$ °С; $\lambda^{08\text{КП}} \approx 28$ Вт/(м·К) и $\alpha_{\text{эф}} \approx 370$ Вт/(м²·К) находим:

$$\tau_{\text{осн}}^{08\text{КП}} = 0,753; \quad \tau_{\text{выд}}^{08\text{КП}} = 0,20 \quad \text{и} \quad \Sigma \tau^{08\text{КП}} = 0,953 \text{ ч};$$

- при $t_{\text{печ}} \approx 1530$ °С; $\lambda^{08\text{КП}} \approx 30$ Вт/(м·К) и $\alpha_{\text{эф}} \approx 500$ Вт/(м²·К) имеем:

$$\tau_{\text{осн}}^{08\text{КП}} = 0,514; \quad \tau_{\text{выд}}^{08\text{КП}} = 0,274 \quad \text{и} \quad \Sigma \tau^{08\text{КП}} = 0,788 \text{ ч}.$$

Сравнивая $\Sigma\tau^{08КП}$ при режимах нагрева, когда температура $t_{печ}$ возросла с 1350 до 1530 °С, видим положительный эффект, связанный с сокращением времени нагрева на величину $0,953 - 0,788 = 0,165$ ч, что приводит к существенному снижению затрат топлива на нагрев без порчи садки (перегрев не наступает).

Для стали 1Х18Н9Т наблюдается несколько иная картина. Имеем:

- при $t_{печ} \approx 1530$ °С; $\lambda^{1Х18Н9Т} \approx 10$ Вт/(м·К) и $\alpha_{эф} \approx 500$ Вт/(м²·К).

Тогда:

$$\tau_{осн}^{1Х18Н9Т} = 0,15; \quad \tau_{выд}^{1Х18Н9Т} = 1,20 \text{ и } \Sigma\tau^{1Х18Н9Т} = 1,35 \text{ ч.}$$

Как видим, $\Sigma\tau^{1Х18Н9Т} > \Sigma\tau^{08КП}$ на величину $1,35 - 0,788 = 0,562$ ч, а это значит, что при увеличении скорости нагрева стали 1Х18Н9Т (в обоих случаях нагрева $Vi \geq Vi_{кр}$), помимо возможного перегрева (перегрев исправляется повторным отжигом в термической печи), энергозатраты существенно возрастут в соответствии с увеличением времени нагрева. Выполненные расчеты хорошо иллюстрируются (рис. 3, 4).

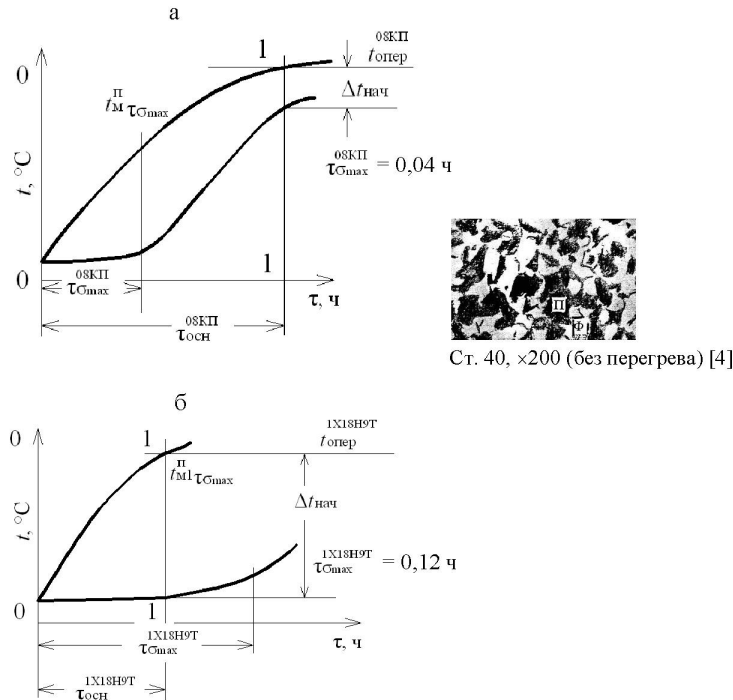


Рис. 3. Нагрев сталей 08КП (а) и 1Х18Н9Т (б) (зона основного нагрева)

В цифрах выполненное исследование можно проиллюстрировать.

Нагрев при первом и втором режимах выполняется в нагревательной проходной полуметодической печи, работающей с максимальным технологическим КПД $\eta_{техн}$, равным 35 % ($\eta_{техн} \approx 35$ %, конечно, без утилизационного теплоиспользования).

Теоретический расход теплоты для нагревания 1 кг стали 1Х18Н9Т составит величину

$$q_t = 1100 \cdot 0,15 \cdot 4,186 = 690 \text{ кДж/кг,}$$

где 1100 и 0,15 – соответственно температура операции и массовая средняя удельная теплоемкость, °С и кДж/(кг · К).

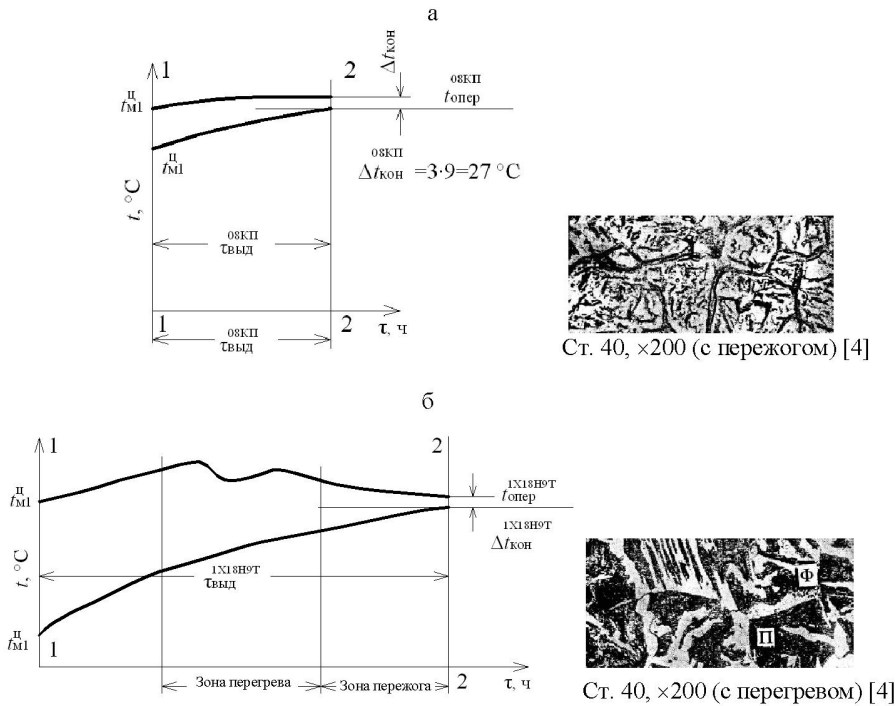


Рис. 4. Нагрев сталей 08КП (а) и 1Х18Н9Т (б) (зона выдержки)

Фактический же расход теплоты для этих целей составит

$$q_{\phi} = \frac{q_t}{\eta_{\text{техн}}}; \quad q_{\phi} = \frac{690}{0,35} = 1971 \text{ кДж/кг.}$$

Или фактический расход газообразного топлива с теплотой сгорания 35 МДж/м³

$$b_{\phi} = \frac{1,971}{35} = 0,056 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Если считать, что время пребывания садки в печи пропорционально расходу топлива, то последний возрастет на 40 %.

Тогда удельный расход топлива, пошедшего на нагревание, увеличится и составит

$$b_{\phi} + \Delta b_{\phi} = 0,056 + 0,4 \cdot 0,056 = 0,078 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

В итоге за счет задержки садки в зоне выдержки ущерб составит (на 1 т стали)

$$\Delta b_{\phi} \approx 78 \text{ м}^3/\text{т.}$$

Затраты же на исправление перегрева

$$b_{\phi}^{\text{ущерб}} = b_{\phi} + b'_{\phi},$$

где $b_{\phi}^{\text{ущерб}}$ – общие удельные затраты на исправление перегрева; b_{ϕ} – затраты на нагрев под операцию горячего формообразования; b'_{ϕ} – затраты (удельные) на нагрев садки в термической печи отжига (повторный нагрев заготовок до температуры операции отжига, равной 850–950 °С).

Имеем

$$q'_r = 900 \cdot 0,15 \cdot 4,186 = 565 \text{ кДж/кг};$$

$$q'_\phi = \frac{565}{\eta_{\text{техн}}};$$

$$q'_\phi = \frac{565}{0,35} = 1614 \text{ кДж/кг}.$$

Или затраты натурального топлива на повторный нагрев в термической печи составят

$$b'_\phi = \frac{1,614}{35} = 0,046 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Окончательный ущерб, связанный с перегревом:

$$b_\phi^{\text{ущерб}} = 0,078 + 0,046 = 0,124 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Или на 1 т стали $b_\phi^{\text{ущерб}} = 124 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Как видим, сценарий последствия нагрева высокоуглеродистой (легированной) стали при температуре печи $t_{\text{печ}} \approx 1530\text{--}1550 \text{ }^\circ\text{C}$ может развиваться так:

- нагрев без перегрева (дополнительные энергозатраты, соответствующие $\Delta\Sigma\tau$);
- нагрев с перегревом стали (дополнительные энергозатраты, пошедшие на первичный нагрев, а также на исправление перегрева путем отжига в термической печи);
- нагрев с перегревом заготовки с последующим формообразованием (изделие показано на рис. 5).

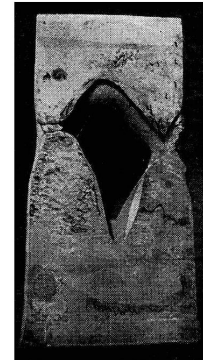


Рис. 5. Сквозное отверстие в слябе, появившееся вследствие большой скорости нагрева при прокатке непрогретого слитка на блюминге [4]

ВЫВОД

В качестве главного вывода можно сказать, что, интенсифицируя процесс нагрева высокоуглеродистых сталей за счет повышения температуры печи $t_{\text{печ}}$, нужно ожидать излишних энергозатрат и порчи садки (перегрев).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. *Металловедение: учеб. для вузов* / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: *Металлургия*, 1986.
2. *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике (справ.)* / под ред. Б. Е. Неймарка. – М.; Л.: *Энергия*, 1967.
3. *Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 1* / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: *БНТУ*, 2007.
4. Суворов, И. К. *Обработка металлов давлением: учеб. для вузов* / И. К. Суворов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: *Высш. шк.*, 1980.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ

Поступила 20.04.2010