

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.

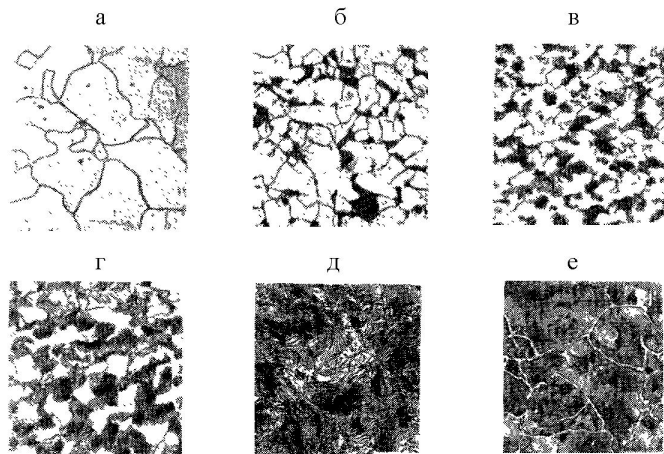


Рис. 1. Структура сталей с различным содержанием углерода ($\times 200$) [1]: \square – феррит, \blacksquare – перлит; а-е – соответственно содержание углерода – 0,04; 0,20; 0,30; 0,50; 0,80 и 1,2 %

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).

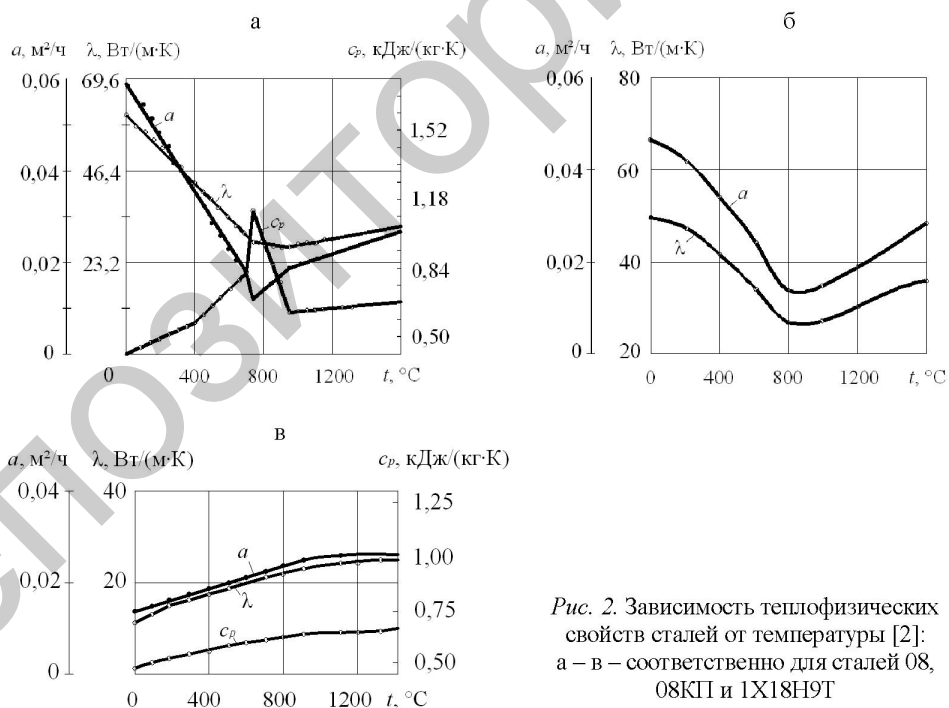


Рис. 2. Зависимость теплофизических свойств сталей от температуры [2]: а – в – соответственно для сталей 08, 08КП и 1Х18Н9Т

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

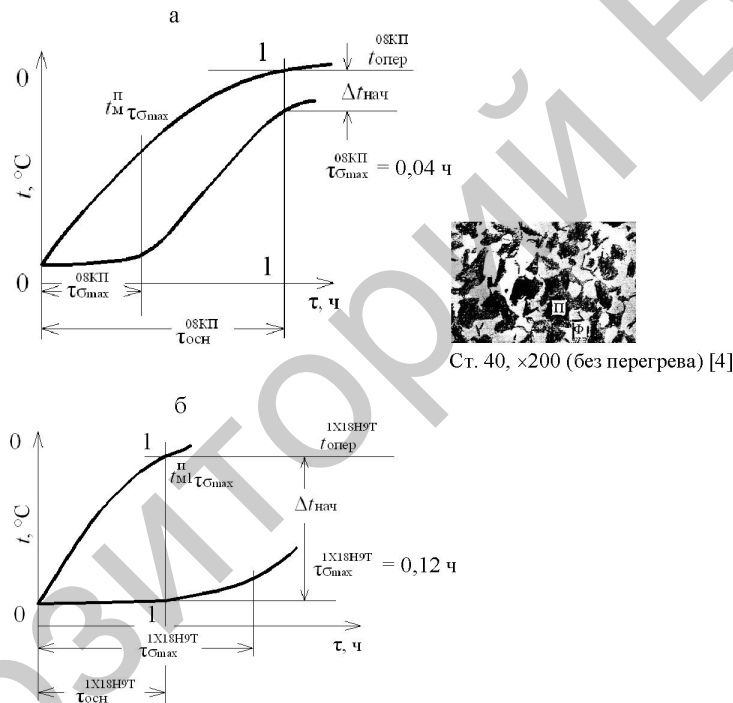


Рис. 3. Нагрев сталей 08КП (а) и 1Х18Н9Т (б) (зона основного нагрева)

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).

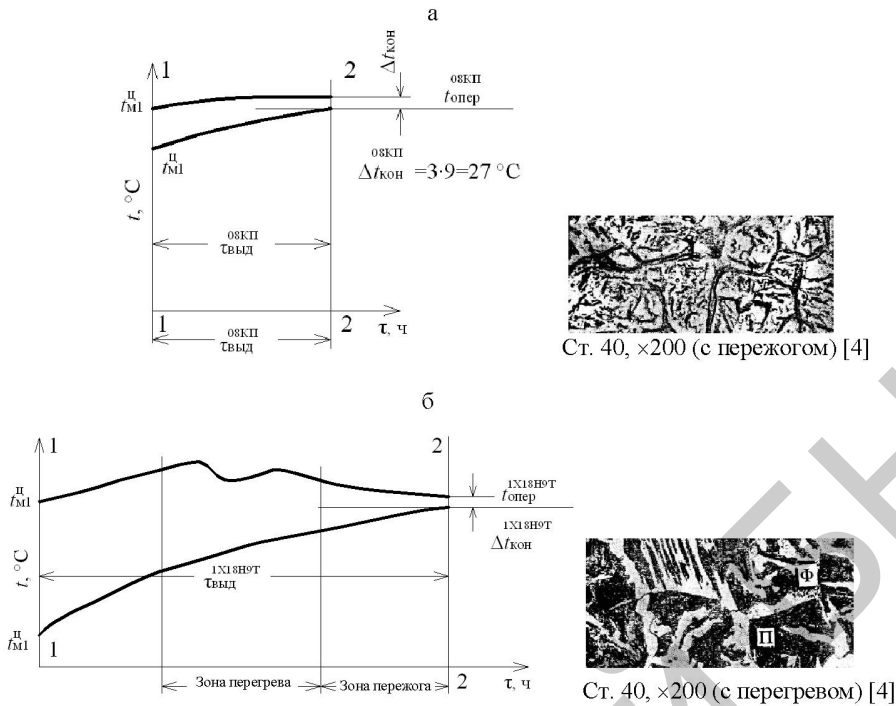


Рис. 4. Нагрев сталей 08КП (а) и 1X18Н9Т (б) (зона выдержки)

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).

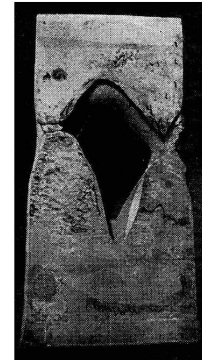


Рис. 5. Сквозное отверстие в слябе, появившееся вследствие большой скорости нагрева при прокатке непрогретого слитка на блюминге [4]

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