

3. В обоих случаях для широкого набора параметров импульсов не зафиксировано усиление лучистого теплообмена, что позволило сделать вывод об отсутствии данного эффекта при импульсном отоплении агрегатов.

4. Сделана попытка объяснения этого эффекта на основании экспоненциального характера изменения температуры теплоносителя, отличного от косинусоидального, задействованного в гипотезе.

5. Таким образом, экономия топлива при импульсном отоплении, кроме случаев сокращения времени «пересиживания» материала в печи, вероятно, объясняется ростом значения коэффициента использования топлива при снижении температуры продуктов сгорания, покидающих агрегат, и сохранении темпа нагрева материала за счет усиления конвективной составляющей теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревун М.П. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей / М.П. Ревун, А.И. Барищенко, А.И. Чепрасов [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005, №3. – С.97-100.
2. Мороз В.И. Нагрев валков холодной прокатки и роликов МНЛЗ под термическую обработку в печи с импульсной подачей теплоносителя / В.И. Мороз, В.М. Егорова, С.В. Гусев // Кузнечно-штамповочное производство и обработка металлов давлением. – 2002, №8. – С.29-34.
3. Неймарк Л.А., Гречишников Я.М., Энно И.К., Милосердов А.В., Белов М.Л. Сравнительные испытания импульсного и непрерывного отопления термической печи. / Л.А. Неймарк, Я.М. Гречишников, И.К. Энно [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987, №9. – С.35-37.
4. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 2001. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 544с.

Надійшла до редакції 02.06.2011

Рецензент к.т.н., доц. В.В. Кочура

© Бирюков А.Б., **Кравцов В.В.**

УДК 621.78.013

Ю.Л.Курбатов, С.И.Гинкул, Ю.Е.Василенко, А.П.Верзилов

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССА НАГРЕВА МАССИВНЫХ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Предложен способ определения температурного поля заготовки упрощенным инженерным методом, что позволит исключить брак по нагреву, а также проводить процесс нагрева с минимальными энергетическими затратами. Представлен анализ изменения температурного поля массивных стальных заготовок для области перехода от упругого к пластичному состоянию металла.

Ключевые слова: тепловой режим, брак, температурное напряжение, заготовка, теплообмен, инженерный метод, динамика нагрева

Постановка задачи

Нагрев перед обработкой давлением крупных заготовок, которые относятся к категории термически массивных тел, сопровождается формированием значительного перепада температур (ΔT) по толщине заготовки, в результате чего возникают температурные напряжения (σ), пропорциональны перепаду температур [1]

$$\sigma = \frac{\beta \cdot E \cdot \Delta T}{A}, \quad (1)$$

и если эти напряжения превосходят допустимые, то это приводит к разрушению металла (трещинам) и браку (σ – напряжение, Н/(мм²); E – модуль упругости материала, Н/(мм²); β – коэффициент линейного расширения, К⁻¹; ΔT – перепад температур между поверхностью и центром заготовки, К; A – безразмерный коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения. При разработке теплового режима нагрева холодной крупной заготовки ставится задача не допустить разрушение металла путем определения щадящих параметров режима. Представляет интерес, предлагаемый в этой работе упрощенный инженерный метод определения этих параметров при переходе от упругой к пластичной области.

Анализ публикаций по теме исследования

Определению параметров нагрева массивных стальных заготовок посвящен ряд работ [1,2,3,4]. В работах Н.Ю.Тайца [4] получены основные зависимости, связывающие механические свойства металла с интенсивностью подвода тепла в процессе нагрева; в работах [1,2] даются практические рекомендации по определению параметров теплового режима. В работе А.В.Лыкова [3] рассматриваются различные математические методы расчета температурного поля, как аналитические, так и численные. В настоящей работе получил развитие инженерный метод расчета температурного поля для области перехода от упругого к пластичному состоянию металла.

Формулировка целей статьи

В имеющихся публикациях отсутствует анализ изменения температурного поля массивных стальных заготовок в период перехода от упругой к пластической области. В настоящей статье поставлена цель разработать такой анализ, а также предложить способ определения температурного поля заготовки упрощенным инженерным методом.

Основная часть

В начальном периоде – до достижения пластичности – планируется допустимый перепад температур

$$\Delta T_{\text{доп}} = \frac{A \cdot \sigma_{\text{доп}}}{\beta \cdot E}, \text{ К} \quad (2)$$

по допустимому значению напряжений $\sigma_{\text{доп}}$, и допустимая плотность теплового потока

$$q_{\text{доп}} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta T_{\text{доп}}}{r_0}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К), r_0 – расчетная толщина заготовки, м.

На конкретной нагревательной печи существует некоторая максимальная плотность теплового потока q_{max} , определяемая максимально возможной тепловой мощностью печи. Если $q_{\text{доп}} > q_{\text{max}}$, то температурные напряжения не опасны для металла. Если $q_{\text{доп}} < q_{\text{max}}$, то требуется дополнительный начальный период нагрева до достижения в центре заготовки ($T_{\text{ц}}$) температуры начала пластичности ($T_{\text{пласт}}$), т.е. требуется «щадящий» нагрев. В таких случаях планируется режим нагрева, состоящий из, например, трех периодов:

1-й период – нагрев при граничных условиях II рода

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_0} = q_{\text{доп}} = \text{const} \quad (4)$$

до $T_{\text{ц}} = T_{\text{пласт}}$;

2-й период – нагрев при граничных условиях II рода

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_0} = q_{\text{max}} = \text{const} \quad (5)$$

до достижения конечного значения температуры печи $T_{\text{печ}} = T_{\text{печ.к}}$.

3-й период – нагрев при граничных условиях III рода

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_0} = C_{\text{пр}} \cdot (T_{\text{печ.к}}^4 - T_{\text{п}}^4), T_{\text{печ.к}} = \text{const} \quad (6)$$

до достижения конечного температурного состояния заготовки.

Постановка задачи для решения инженерным методом может быть сформулирована следующим образом. Задаются форма и размер заготовки,

механические и теплофизические свойства стали, начальная температура металла, конечное температурное состояние в виде температур на поверхности ($T_{п.к.}$) и в центре ($T_{ц.к.}$) заготовки. В процессе расчета требуется определить время нагрева как сумму продолжительности трех периодов.

Схема тепловой диаграммы процесса нагрева представлена на рис. 1 в виде изменения во времени характерных температур заготовки (центра $T_{ц}$, поверхности $T_{п}$, среднemasсовой \bar{T}), температуры печи $T_{печ}$, а также плотности теплового потока q .

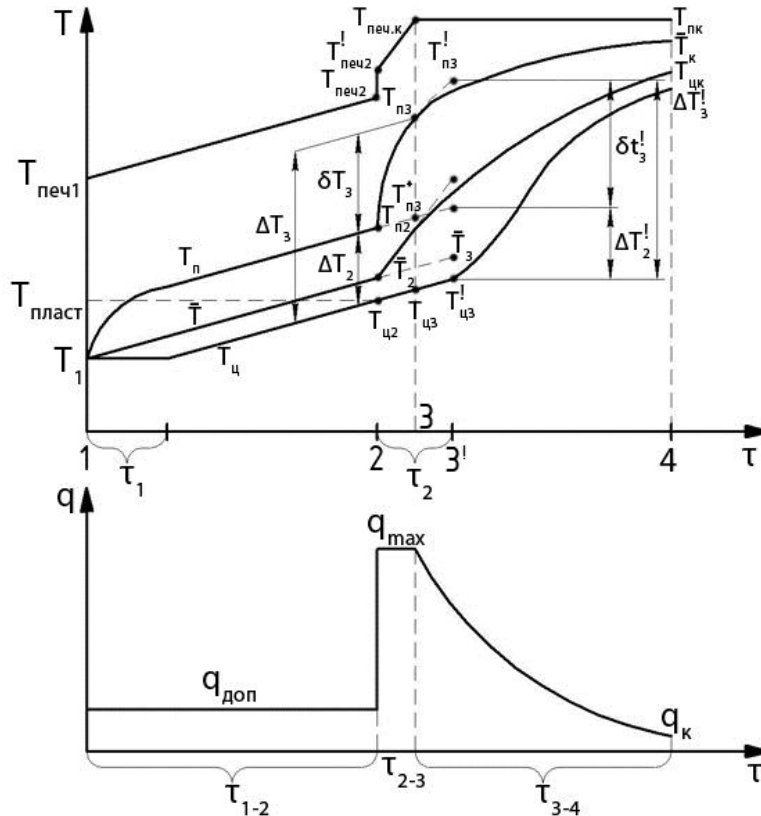


Рисунок 1 – Схема теплового режима.

Первый период нагрева массивного тела начинается с инерционного участка

$$\tau'_1 = \frac{r_0^2}{k \cdot a_1}, \tag{7}$$

в течение которого тепловой поток достигает центра, и считается, что температура центра остается неизменной, а скорость нагрева поверхности уменьшается. (k – коэффициент формы, a_1 - коэффициент теплопроводности при \bar{T}_1 , m^2/c). После инерционного участка в регулярном режиме температуры изменяются линейно со скоростью $C_{н1}$, пропорциональной допустимому тепловому потоку $q_{доп}$:

$$\frac{dT}{d\tau} \equiv C_{н1} = \frac{k_1 \cdot q_{доп}}{r_0 \cdot \rho \cdot c}, \quad (8)$$

а перепад температур ΔT , пропорциональный тепловому потоку $q_{доп}$, остается постоянным. (c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; k_1 – коэффициент материальной нагрузки, зависящий от формы поперечного сечения заготовки),

Продолжительность первого периода τ_{1-2} по инженерному методу тепловой диаграммы определяется из уравнения теплового баланса [2]

$$q_{доп} \cdot F \cdot \tau_{1-2} = G \cdot c (\bar{T}_2 - \bar{T}_1), \quad (9)$$

откуда

$$\tau_{1-2} = \frac{G \cdot c}{F \cdot q_{доп}} (\bar{T}_2 - \bar{T}_1), \quad (10)$$

или

$$\tau_{1-2} = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_{доп}} (\bar{T}_2 - \bar{T}_1), \quad (11)$$

где G – масса заготовки, кг; F – поверхность нагрева, м²; \bar{T}_1, \bar{T}_2 – средне-массовые температуры заготовки в начале и конце периода, К,

$$\bar{T}_2 = T_{ц2} + \frac{\Delta T_2}{k_3}, \quad (12)$$

или

$$\bar{T}_2 = T_{пласт} + \frac{\Delta T_{доп}}{k_3}, \quad (13)$$

где k_3 – коэффициент усреднения температуры, зависящий от формы поперечного сечения заготовки.

Второй период начинается с второго инерционного участка

$$\tau'_2 = \frac{r_0^2}{k \cdot a_2}, \quad (14)$$

в течение которого температура центра увеличивается со скоростью $C_{н1}$, пропорциональной $q_{доп}$, среднemasсовая температура увеличивается со скоростью $C_{н2}$, пропорциональной q_{max}

$$C_{н2} = \frac{k_1 \cdot q_{max}}{r_0 \cdot \rho \cdot c}, \quad (15)$$

а температура поверхности увеличивается с уменьшающейся скоростью. В течение второго инерционного участка по сечению заготовки формируется перепад температур, пропорциональный q_{max} . В начале второго периода температура печи скачкообразно изменяется от значения, соответствующего $q_{доп}$

$$T_{печ.2} = \sqrt[4]{\frac{q_{доп}}{C_{пр}} + T_{п2}^4} \quad (16)$$

до значения, соответствующего q_{max}

$$T'_{печ.2} = \sqrt[4]{\frac{q_{max}}{C_{пр}} + T_{п2}^4}, \quad (17)$$

затем температура печи плавно увеличивается до $T_{печ.к}$. Это происходит в течении периода τ_{2-3} при постоянном тепловом потоке q_{max} , а температура поверхности заготовки достигает значения, определяемого из уравнения лучистого теплообмена

$$T_{п3} = \sqrt[4]{T_{печ.к}^4 - \frac{q_{max}}{C_{пр}}}. \quad (18)$$

В конце второго инерционного участка температура поверхности должна повыситься до значения, определяемого из выражения

$$T'_{п3} = T'_{ц3} + \Delta T'_3, \quad (19)$$

где

$$T'_{ц3} = T_{ц2} + \tau'_2 \cdot C_{н1}, \quad (20)$$

$$\Delta T'_3 = \frac{q_{max} \cdot r_0}{2 \cdot \lambda'_3}. \quad (21)$$

Если $T_{пз} > T'_{пз}$, то $\tau_{2-3} > \tau'_2$, и определение продолжительности второго периода производится так же, как первого. Если $T_{пз} < T'_{пз}$, то $\tau_{2-3} < \tau'_2$, т.е. второй перепад заканчивается раньше, чем второй инерционный участок. Для определения τ_{2-3} предлагается способ, который приводится ниже.

А.В.Лыков [3] предложил решение для начального участка в виде

$$\frac{\Delta T}{\Delta T'} = 4 \cdot \sqrt{\frac{Fo}{\pi}} + Fo, \quad (22)$$

где значение критерия Фурье

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{r_0^2} \quad (23)$$

находится в пределах $0 \div 0,12$.

Численным экспериментом показано, что с погрешностью не более 5% можно пренебречь вторым слагаемым в правой части, и тогда

$$\frac{\Delta T}{\Delta T'} = \sqrt{\frac{Fo}{Fo'}} = \sqrt{\frac{\tau}{\tau'}}. \quad (24)$$

Применительно к мгновенному переходу от $q_{доп}$ к q_{max} $\Delta T'$ соответствует приращению перепада температур по сечению заготовки за счет увеличения теплового потока в конце второго инерционного участка $\delta T'_3$ (рисунок 1), а ΔT – приращению перепада температур δT_3 . Таким образом, продолжительность второго периода может быть определена из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\delta T_3}{\delta T'_3} = \sqrt{\frac{\tau_{2-3}}{\tau'_2}} \\ \delta T_3 = T_{пз} - (T_{п2} + C_{н1} \cdot \tau_{2-3}) \end{cases} \quad (25)$$

Приращение $\delta T'_3$ определяется как разница перепадов температур, соответствующих тепловым потокам q_{max} и $q_{доп}$

$$\delta T'_3 = \Delta T'_3 - \Delta T_2. \quad (26)$$

Среднемассовая температура заготовки в конце периода $q_{max} = const$ определяется по скорости нагрева $C_{н2}$

$$\bar{T}_3 = \bar{T}_2 + C_{H2} \cdot \tau_{2-3}, \quad (27)$$

а температура в центре – по скорости C_{H1}

$$T_{ц3} = T_{ц2} + C_{H1} \cdot \tau_{2-3}. \quad (28)$$

Продолжительность третьего периода определяется по методу тепловой диаграммы

$$\tau_{3-4} = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}} (\bar{T}_4 - \bar{T}_3), \quad (29)$$

где

$$\bar{q} = \frac{q_{\max} - q_k}{\ln \frac{q_{\max}}{q_k}}, \quad (30)$$

а

$$q_k = \frac{k_2 \cdot \lambda \cdot \Delta T_k}{r_0}. \quad (31)$$

На рисунке 2 представлены результаты разработки теплового режима нагрева стальной цилиндрической заготовки диаметром 0,8м с ограничением скорости нагрева по температурным напряжениям с применением инженерного метода.

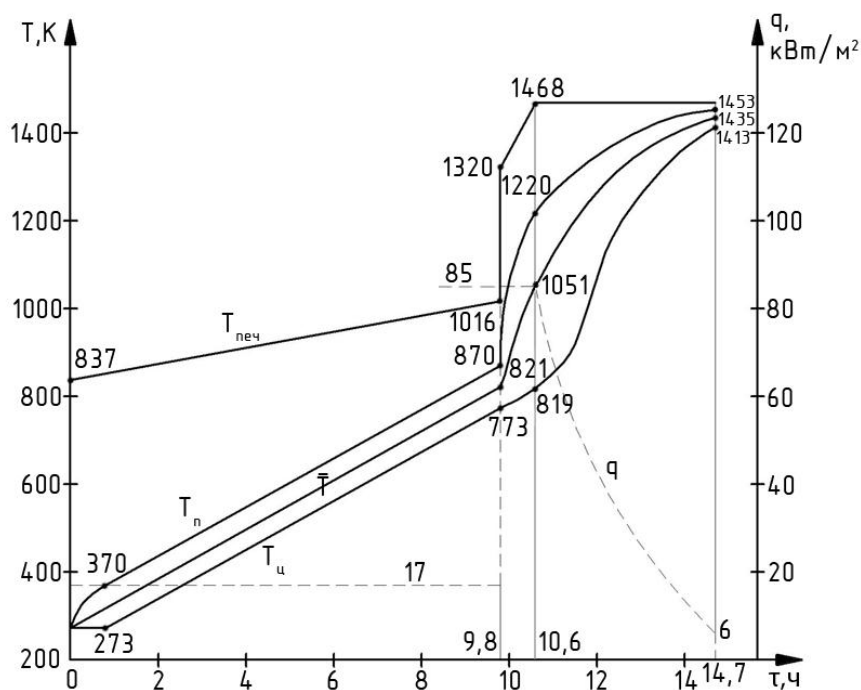


Рисунок 2 – Режим нагрева, рассчитанный по инженерному методу

На рисунку 3 приведён режим, разработанный численным методом конечных разностей (неявная схема). Сравнение методов показывает высокую сходимость.

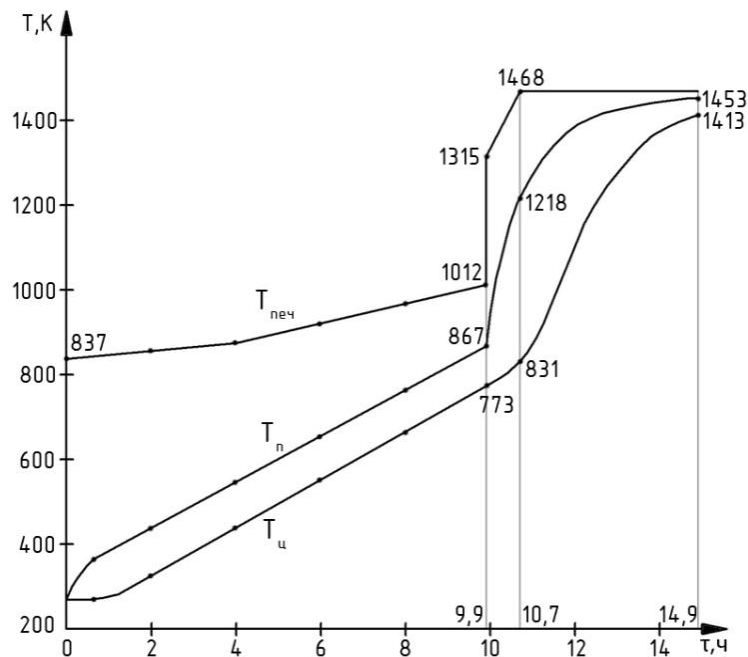


Рисунок 3 – Режим нагрева, разработанный численным методом

Выводы

Таким образом, в работе предложен инженерный метод тепловой диаграммы для разработки режима нагрева массивной стальной заготовки с ограничениями по температурным напряжениям, а также сделан анализ динамики нагрева при мгновенном увеличении теплового потока. Применение метода даёт возможность исключить брак по нагреву, а также провести процесс нагрева с минимальными энергетическими затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства. Т.1. Теоретические основы/ В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов. – М.: «МИСИС», 2002. – 608с.
2. Розенгарт Ю.И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах/ Ю.И. Розенгарт, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский. – К.; Донецк: Вища школа. Головное издательство, 1986. – 296с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
4. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 568с.

Надійшла до редакції 02.06.2011

Рецензент к.т.н., доц. В.В. Кочура

© Курбатов Ю.Л., Гинкул С.И., Василенко Ю.Е., Верзилов А.П.