**УДК 621.78.013**

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

*(ДонНТУ, г.Донецк)*

**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.*

**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 по толщине заготовки, в результате чего возникают температурные напряжения (), пропорциональны перепаду температур [1]

и если эти напряжения превосходят допустимые, то это приводит к разрушению металла (трещинам) и браку ( – напряжение, Н/(мм2); – модуль упругости материала, Н/(мм2); – коэффициент линейного расширения, К-1; - перепад температур между поверхностью и центром заготовки, К; – 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 интенсивностю 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

по допустимому значению напряжений , и допустимая плотность теплового потока

где коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К), – расчетная толщина заготовки, м. На конкретной нагревательной печи существует некоторая максимальная плотность теплового потока , определяемая максимально возможной тепловой мощностью печи. Если , то температурные напряжения не опасны для металла. Если , то требуется дополнительный начальный период нагрева до достижения в центре заготовки ()температуры начала пластичности (), 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

до ;

2-й период – нагрев при граничных условиях II рода

до достижения конечного значения температуры печи .

3-й период – нагрев при граничных условиях III рода

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 () и в центре () 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 , поверхности , среднемассовой ), температуры печи , а также плотности теплового потока . Первый период нагрева массивного тела начинается с инерционного участка

в течение которого тепловой поток достигает центра, и считается, что температура центра остается неизменной, а скорость нагрева поверхности уменьшается. ( – коэффициент формы, - коэффициент температуропроводности при , м2/с). После инерционного участка в регулярном режиме температуры изменяются линейно со скоростью , пропорциональной допустимому тепловому потоку :

а перепад температур , пропорциональный тепловому потоку , остается постоянным. ( – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); – плотность, кг/м3; – коэффициент материальной нагрузки, зависящий от формы поперечного сечения заготовки),

Продолжительность первого периода по инженерному методу тепловой диаграммы определяется из уравнения теплового баланса [2]

откуда

или

где – масса заготовки, кг; – поверхность нагрева, м2; – среднемассовые температуры заготовки в начале и конце периода, К,

или

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

Второй период начинается с второго инерционного участка

в течение которого температура центра увеличивается со скоростью , пропорциональной , среднемассовая температура увеличивается со скоростью , пропорциональной

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

до значения, соответствующего

затем температура печи плавно увеличивается до . Это происходит в течении периода при постоянном тепловом потоке , а температура поверхности заготовки достигает значения, определяемого из уравнения лучистого теплообмена

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

где

Если , то , и определение продолжительности второго периода производиться так же, как первого. Если , то , т.е. второй перепад заканчивается раньше, чем второй инерционный участок. Для определения предлагается способ, который приводится ниже.

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

где значение критерия Фурье

находится в пределах 00,12.

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

Применительно к мгновенному переходу от к соответствует приращению перепада температур по сечению заготовки за счет увеличения теплового потока в конце второго инерционного участка (рисунок 1), а – приращению перепада температур . Таким образом, продолжительность второго периода может быть определена из системы уравнений

Приращение определяется как разница перепадов температур, соответствующих тепловым потокам и

Среднемассовая температура заготовки в конце периода определяется по скорости нагрева

а температура в центре – по скорости

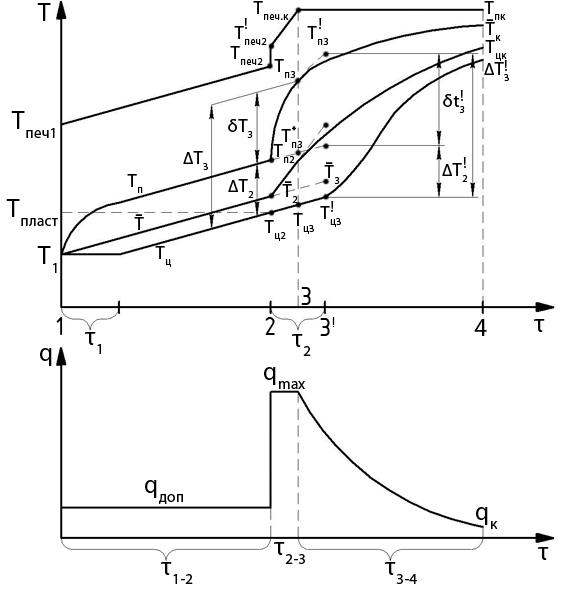


Рисунок 1 – Схема теплового режима

Продолжительность третьего периода определяется по методу тепловой диаграммы

где

а

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

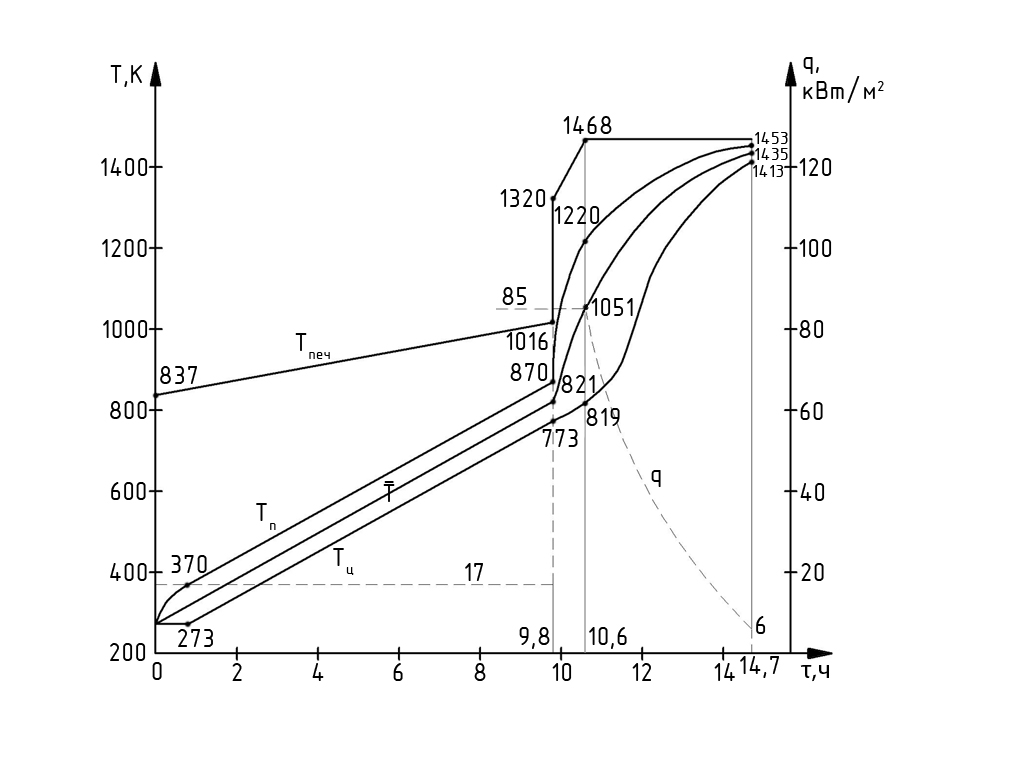


Рисунок 2 – Режим нагрева, рассчитанный по инженерному методу

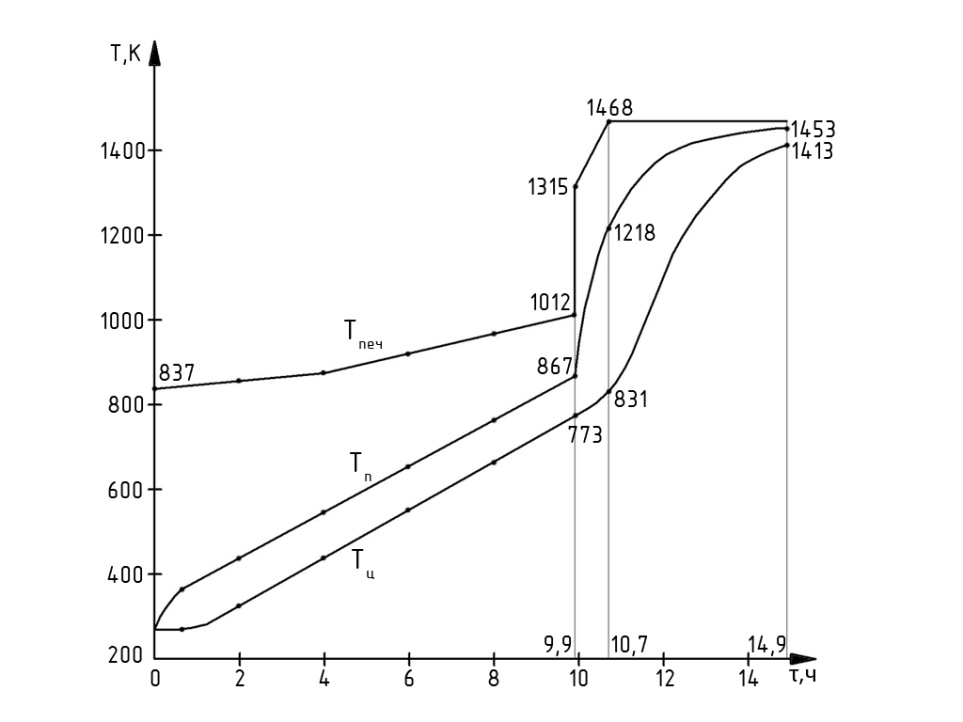


Рисунок 3 – Режим нагрева, разработанный численным методом

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 дает 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.