

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. В. САЛОМАТОВ, А. А. ТОРЛОПОВ

(Представлена кафедрой котлостроения и котельных установок)

Составление оптимальных режимных карт нагрева стальных заготовок и слитков возможно лишь при наличии точной информации о кинетике протекающих в этом случае процессов. Как правило, инженерная практика не всегда располагает достаточно полным объемом достоверных данных по физическим и технологическим параметрам, поэтому приходится ограничиваться некоторой дискретной информацией, по анализу которой обычно делается заключение о качестве нагрева.

Исследование теплофизики взаимосвязанной системы—металлургической печь-металл является весьма сложной проблемой, которая при изучении распадается на две самостоятельные задачи: внешнюю, в которой анализируется формирование условий теплообмена, и внутреннюю, в которой рассматриваются закономерности теплопереноса внутри нагреваемого изделия при заданном тепловом потоке на граничной поверхности. Сознательно ограничиваясь рассмотрением только внутренней задачи, как наиболее ответственной с точки зрения получения качественного металла, практика нагрева в качестве опорных показателей определяет: время нагрева заготовки, величину максимальной разности температур по сечению слитка и момент ее наступления.

Завышение норм времени нагрева снижает возможную производительность печей и увеличивает расход топлива. Незнание величин максимальной разности температур по сечению заготовки и фиксированного момента ее наступления приводит к неправильному назначению режима нагрева, опасного в отдельных случаях с точки зрения возникающих температурных напряжений.

Эти показатели могут стать определяющими лишь при таких методах расчета температурного поля, которые учитывают достаточно точно не только условия нагрева (температура внешней среды, наличие лучистого и конвективного теплового потока), но и явления, происходящие в самом нагреваемом теле (изменение теплофизических характеристик, наличие структурных превращений).

Настоящая работа проводится под углом теоретического исследования динамики нагрева стальных изделий с целью получения достаточно простого и надежного метода расчета указанных показателей.

Известно, что в настоящее время пока не существует аналитических зависимостей по расчету нестационарного распределения температур в телах с переменными теплофизическими характеристиками и фазовы-

ми превращениями, подвергнутых одновременному воздействию радиации и конвекции. Трудность здесь состоит в том, что анализируемая задача теплопроводности относится к классу дважды нелинейных. Поэтому решение такого рода задачи возможно лишь с помощью численных методов.

Нами такая задача решалась на электронно-вычислительной машине «Минск-1» [1]. Получен обширный числовой материал по температурным полям при нагреве изделий из стали углеродистого и аустенитного типа в форме пластины и цилиндра при задании в широких пределах режимных параметров.

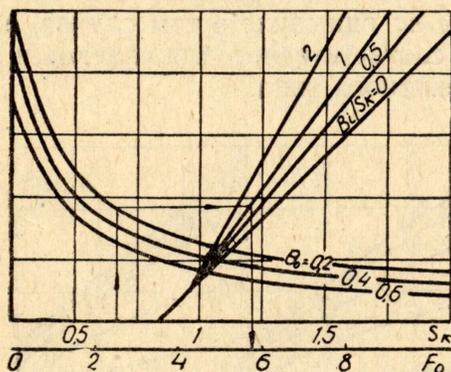


Рис. 1. Зависимость времени нагрева изделий из углеродистых сталей от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk для неограниченной пластины ($\Delta\theta = 0,012$).

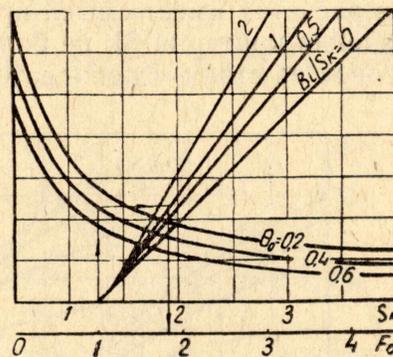


Рис. 2. Зависимость времени нагрева изделий из сталей аустенитного типа от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk для неограниченной пластины ($\Delta\theta = 0,012$).

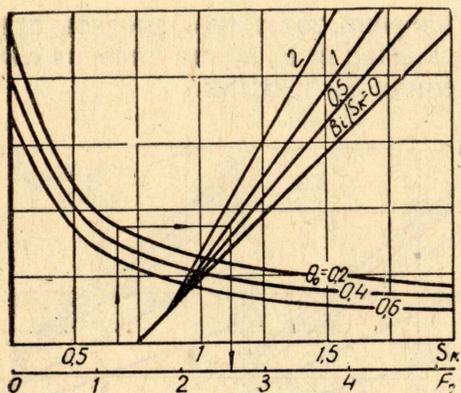


Рис. 3. Зависимость времени нагрева изделий из углеродистых сталей от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk для бесконечного цилиндра ($\Delta\theta = 0,012$).

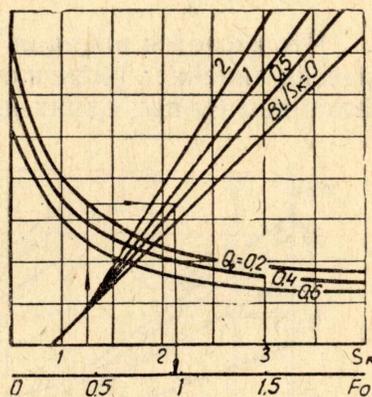


Рис. 4. Зависимость времени нагрева изделий из сталей аустенитного типа от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk для бесконечного цилиндра ($\Delta\theta = 0,012$).

Объективным критерием конца нагрева является разность температур по сечению изделия. Для каждой операции обработки заготовок и слитков существует определенная максимальная величина допустимой степени неравномерности прогрева. Зная количественную связь времени конца нагрева от критериев θ_0 , Sk , Bi/Sk при заданной величине степени неравномерности температур по сечению металла, удастся построить расчетные диаграммы. На рис. 1, 2, 3, 4 представлены такие зависимо-

сти по расчету времени нагрева тел, которые практически могут быть приняты как неограниченные пластины и бесконечные цилиндры.

Как видно из приведенных графиков величина критерия F_0 , соответствующая концу нагрева, претерпевает существенные изменения до значения $Sk = 1$ для изделий из углеродистой и значения $Sk = 2$ — из аустенитной стали. За пределами этих значений критерия Sk наблюдается слабое изменение анализируемой величины F_0 от критериев внешнего теплообмена.

Конвективная составляющая теплового потока ускоряет нагрев изделий с изменяющимися теплофизическими характеристиками тем интенсивнее, чем меньше величина радиационного критерия Sk . Однако при расчетах имеет смысл принимать ее во внимание в том случае, если значения критерия Sk не более 1 или 2 соответственно для слитков и заготовок из стали углеродистого и аустенитного типа.

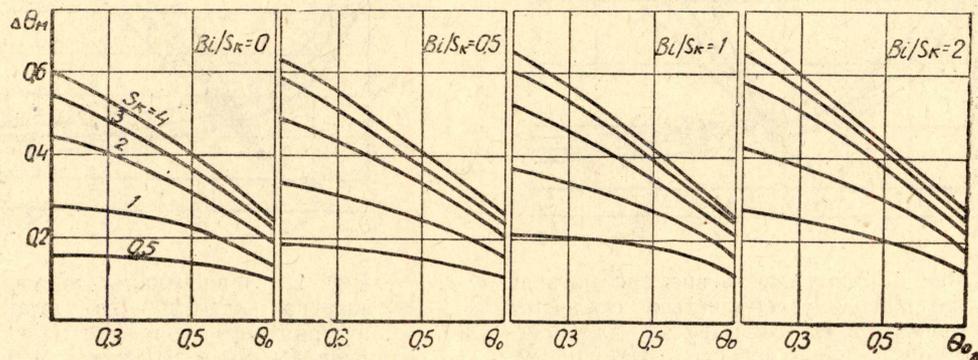


Рис. 5. Изменение максимальной разности температур, по сечению изделия из углеродистых сталей от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk для неограниченной пластины и цилиндра.

Что касается влияния θ_0 на конец нагрева, то можно отметить практически линейное уменьшение величины критерия F_0 конца нагрева с возрастанием θ_0 при одних и тех же значениях Sk и Bi/Sk .

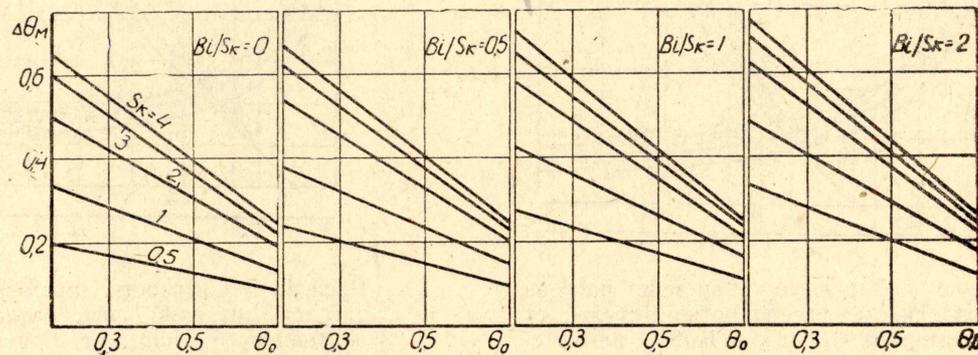


Рис. 6. Изменение максимальной разности температур по сечению изделия из сталей аустенитного типа от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk для неограниченной пластины и цилиндра.

Для назначения безопасного режима нагрева, как указывалось выше, определяющую роль играет величина максимальной разности температур по сечению металла. В связи с трудностями непосредственного измерения этого параметра в производственных условиях появляется необходимость заранее иметь представление о величине $\Delta\theta_m$ и моменте

ее достижения при различных режимах нагрева. Располагая числовыми данными по температурным полям в нагреваемых изделиях, можно установить количественные зависимости $\Delta\theta_m$ от критериев θ_0 , Sk и Bi/Sk . Такие зависимости представлены на рис. 5 и 6.

На основе анализа полученных результатов можно констатировать, что при нагреве заготовок и слитков с изменяющимися термическими коэффициентами величина максимальной разности температур при прочих равных условиях инвариантна по отношению к форме изделия. Характерно, что та же особенность наблюдается при расчете нагрева изделий с постоянными теплофизическими характеристиками [2]. Поэтому рис. 5, 6 можно использовать как для неограниченной пластины, так и для бесконечного цилиндра.

Для изделий из сталей аустенитного типа наблюдается линейная зависимость $\Delta\theta_m$ от θ_0 , а для изделий из углеродистой стали эта закономерность наступает при значениях критерия Sk больше 4.

Значения $\Delta\theta_m$ при одинаковых критериях θ_0 и Sk находятся в линейной связи с отношением Bi/Sk .

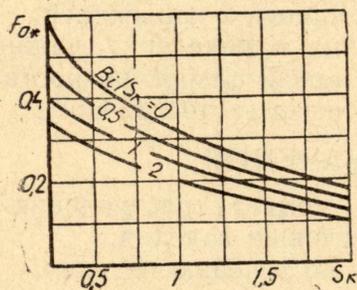


Рис. 7. Зависимость момента наступления $\Delta\theta_m$ от критериев внешнего теплообмена для неограниченной пластины из углеродистых сталей.

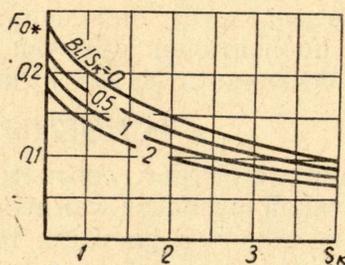


Рис. 8. Зависимость момента наступления $\Delta\theta_m$ от критериев внешнего теплообмена для неограниченной пластины из сталей аустенитного типа.

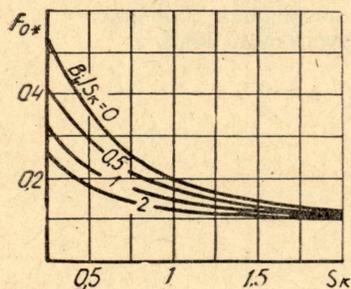


Рис. 9. Зависимость момента наступления $\Delta\theta_m$ от критериев внешнего теплообмена для бесконечного цилиндра из углеродистых сталей.

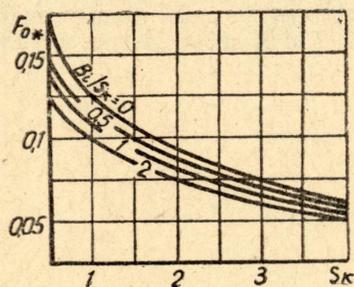


Рис. 10. Зависимость момента наступления $\Delta\theta_m$ от критериев внешнего теплообмена для бесконечного цилиндра из сталей аустенитного типа.

Зная величины критериев внешнего теплообмена, момент наступления максимальной разности температур по сечению слитков определяется по рис. 7, 8, 9, 10. Исследование показывает, что момент достижения $\Delta\theta_m$ не одинаков для тел разной формы и материала. Так, при прогреве пластины из стали аустенитного типа он наступает при значениях

$Fo = 0,07 \div 0,3$; а для цилиндра — при $Fo = 0,05 \div 0,2$ в пределах изменения критерия $Sk = 0,5-4$. При нагреве изделий из углеродистой стали время наступления $\Delta\theta_m$ лежит в пределах $Fo = 0,1 \div 0,6$ и $Fo = 0,1 \div 0,55$ соответственно для пластины и цилиндра при изменении критерия $Sk = 0,25 \div 2$.

Для материалов из углеродистой стали при значениях критерия $Sk < 0,75$ принципиально $\Delta\theta_m$ находится в зоне пластических деформаций, но так как наибольшую опасность для сплошности металла представляет начальная стадия нагрева, когда материал еще обладает упругими свойствами, то в качестве определяющей величины необходимо брать максимальную разность температур по сечению, возникающую именно в этой зоне. Рис. 7 и 9 построены с учетом этого обстоятельства.

Выводы

1. Впервые на базе обширного числового материала по температурным полям дается анализ динамики нагрева стальных изделий с переменными теплофизическими характеристиками и структурными превращениями, прогреваемых совместно радиацией и конвекцией.

2. Предлагается инженерная методика определения важных для практики показателей: времени нагрева, максимальной разности температур по сечению стальных изделий и момента ее достижения.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Fo_* — критерий Фурье, соответствующий моменту наступления максимальной разности температур по сечению изделия;

$\Delta\theta_m$ — максимальная разность температур по сечению изделия;

$\Delta\theta$ — степень неравномерности прогрева тел, равная разности температур поверхности и центра изделия в конце нагрева.

Остальные обозначения общеприняты.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Саломатов, А. А. Торлопов. Прогрев металлических изделий лучисто-конвективным теплом с учетом переменности термических коэффициентов и теплового эффекта структурных превращений, статья в настоящем сборнике.

2. Г. П. Иванцов. Нагрев металла, Металлургиздат, 1948.