

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПРОГРЕВА СТАЛИ С УЧЕТОМ ТЕПЛА РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Г. П. БОЙКОВ

Представлено профессором ФУКС Г. И.

Ранее были предложены расчетные соотношения для определения температурного поля в твердых телах при прогреве их лучистым теплом [4], [5]. Так, например, формула для бесконечного цилиндра была дана в виде (1):

$$\begin{aligned} \frac{T_m(r)}{T_c} = \frac{T_o}{T_c} + \frac{g_c \cdot R}{\lambda_1 \cdot T_c} & \left\{ 2 \frac{a_1 \tau_1}{R^2} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} \frac{g_{ci}}{g_c} \cdot \frac{c_i}{c_i} - \frac{1}{4} \cdot \frac{g_{cm}}{g_c} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_m} \cdot \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) - \right. \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \cdot \left[\frac{g_{c1}}{g_c} \cdot e^{-\mu_n^2 \sum_{i=1}^{i=m} \frac{a_i \cdot \tau_1}{R^2}} - \right. \\ & \left. \left. - \sum_{i=1}^{i=m-1} \left(\frac{g_{ci}}{g_c} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_i} - \frac{g_{c(i+1)}}{g_c} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_{(i+1)}} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \sum_{k=1}^{k=m-i} \frac{a_{(i+k)} \tau_1}{R^2}} \right] \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где расчетный интервал времени и лучистый поток определялись из соотношений:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{0,022 \cdot \lambda_1 \cdot T_c \cdot R}{g_c \cdot a_1}, \\ \varphi &< 1 - \frac{a_2}{a_1} \left\{ 1 - \frac{2 \left(g_{c1} - g_{c2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)}{g_{c1} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\mu_n^2 \frac{a_1 \tau_1}{R^2}} \right]} \right\}, \\ g_{ci} &= \varepsilon_n C_o \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i-1}}{100} \right)^4 \right]. \end{aligned}$$

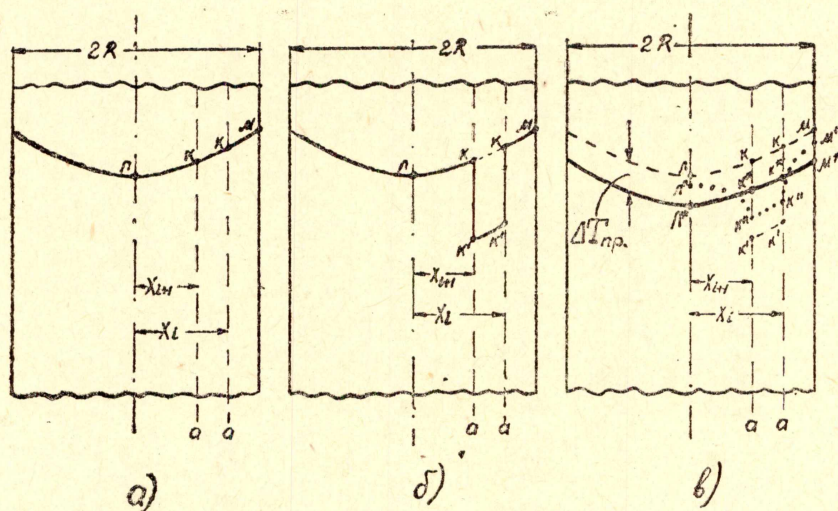
Аналогичные зависимости были предложены и для ряда других тел.

Исследования показали, что предложенные расчетные формулы достаточно удовлетворительно отражают действительный процесс нагрева. Однако при прогреве стали наблюдается чувствительное отклонение опытных и расчетных данных в интервале структурного превращения. Это объясняется тем, что система дифференциальных уравнений, описывающих процесс нестационарной теплопроводности, не учитывает поглощение части тепла при изменении кристаллической решетки. Указанное

превращение наблюдается в тот период нагрева, когда температура достигает определенного для данной стали значения.

Так как при нагреве тел частицы вещества у поверхности нагреваются скорее, то и поглощение теплоты рекристаллизации начинается в слоях, близких к поверхности, постепенно (по мере повышения температуры) распространяясь в глубь тела. Это явление безусловно сказывается на характере температурного поля. Нами сделана попытка по возможности учесть влияние тепла, поглощенного при рекристаллизации, и показано, как внести уточнение в методику расчета.

Влияние поглощенного в процессе превращения тепла на нагрев стали может быть в определенной мере учтено, если принять некоторые допущения и исходить из следующих рассуждений. Пусть имеем какое-либо распределение температуры, например, в неограниченной пластине (фиг. 1 а), на котором отметим точки L , K , M . В результате погло-



Фиг. 1

щения тепла в слое $x_i - x_{i+1}$ в зоне объема aa происходит падение температуры от точек K до точек K' (фиг. 1 б). Понижение температуры в указанном участке обуславливает приток тепла из других частей тела. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение температуры от точек M и L до точек M'' и L'' , а также в других участках. В то же время в зоне $x_i - x_{i+1}$ температуры повышаются от K' до точек K'' .

Наконец точки L^* , K^* , K'' , M^* (фиг. 1 в) оказываются на линии $L^* K^* K'' M^*$, которая описывается аналогичным уравнением, что и первоначальное распределение температуры $L K K M$. Далее нагрев идет обычным путем и рассчитывается по тем же соотношениям, пока в какой-либо части тела вновь не произойдет структурное превращение и потеря в связи с этим новой порции тепла. При симметричном нагреве описанное явление происходит одновременно на участках справа и слева от оси симметрии тела.

Для того, чтобы можно было воспользоваться расчетными формулами при таком представлении процесса, необходимо знать величину среднего падения температуры $\Delta T_{кр}$. Эта величина для тел различной конфигурации будет различной. Если, например, мы имеем дело с прогревом неограниченной пластины, то количество тепла, которое было

поглощено в объеме пластины, ограниченном сечением x_i и x_{i+1} , можно определить, как

$$Q_{np} = g_{np} (x_i - x_{i+1}) \cdot 1 \cdot 1 \cdot \gamma \text{ ккал},$$

где $g_{np} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ — тепло, поглощенное единицей веса вещества, определяе-

мое на основе специальных опытов [1].

Определенное таким образом количество тепла Q_{np} идет на понижение температуры всего рассматриваемого тела. Поэтому

$$Q_{np} = c_{cp} \cdot \gamma \cdot \Delta T_{np} \cdot R \cdot 1 \cdot 1 \text{ ккал}$$

Сопоставляя эти два уравнения, находим:

$$\Delta T_{np} = \frac{g_{np}}{c_{cp}} \cdot \frac{(x_i - x_{i+1})}{R}.$$

Такие же рассуждения дают возможность найти среднее падение температуры и для любых других тел. Так, для бесконечного цилиндра и шара получаем:

$$\Delta T_{np}^{цил} = \frac{g_{np}}{c_{cp}} \cdot \frac{(r_i^2 - r_{i+1}^2)}{R^2},$$

$$\Delta T_{np}^{шара} = \frac{g_{np}}{c_{cp}} \cdot \frac{(r_i^3 - r_{i+1}^3)}{R^3}$$

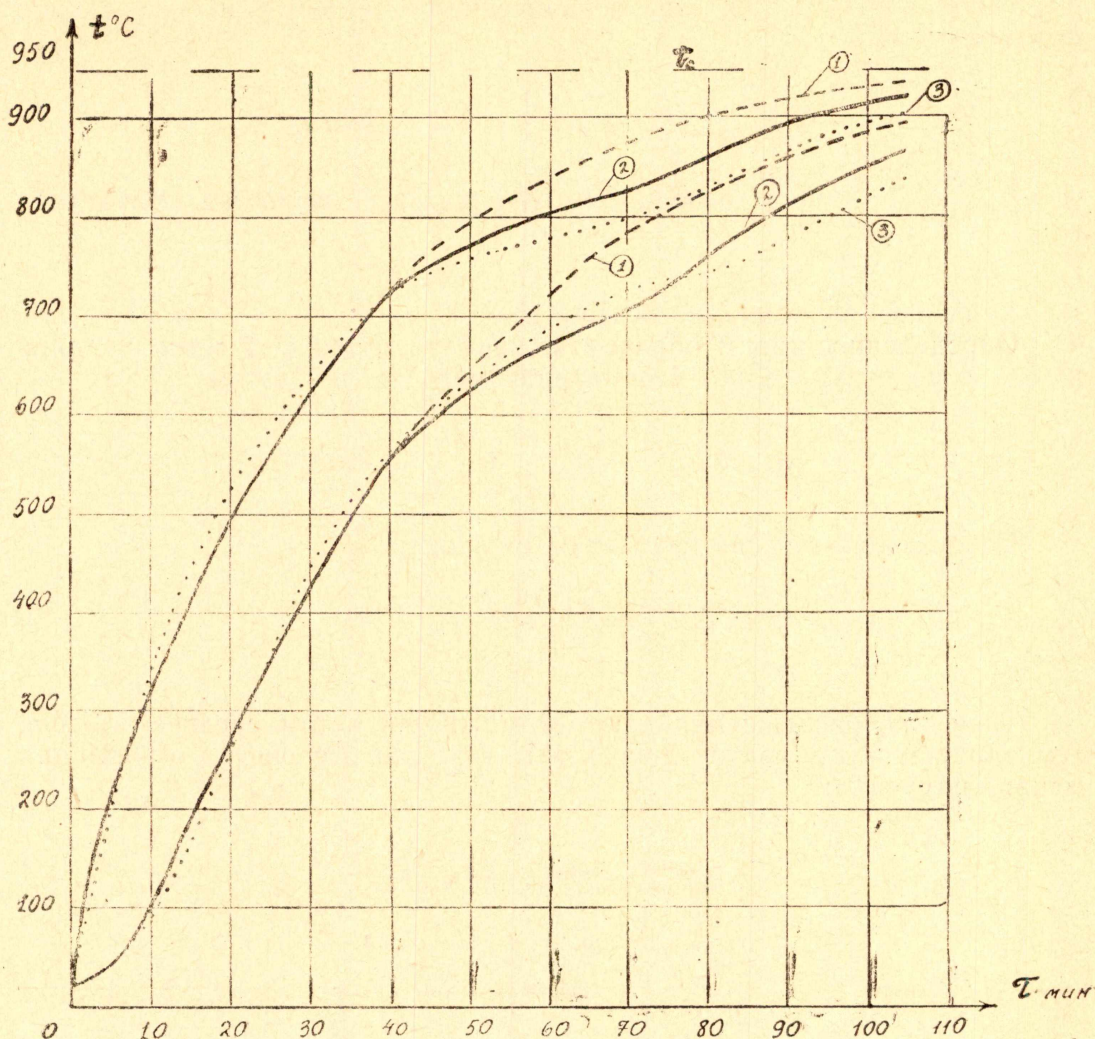
В представленных формулах для определения среднего падения температуры величины $(x_i - x_{i+1})$ и $(r_i - r_{i+1})$ суть участки тела, в которых произошло поглощение тепла в результате превращения;

$c_{cp} \frac{\text{ккал}}{\text{кг град}}$ — средняя теплоемкость вещества в данный момент;

$2R [м]$ — толщина или диаметр тела.

На фиг. 2 показан прогрев цилиндра $d = 300 \text{ мм}$ из стали 9Х. Кривые 1, показывающие изменение температуры поверхности и центра цилиндра, построены по формуле (1) без учета поглощения теплоты рекристаллизации. Кривые 2, показывающие изменение температуры поверхности и центра цилиндра, построены по формуле (1) с учетом поглощения теплоты рекристаллизации. В расчетах численная величина теплоты превращения (14,53 ккал/кг) бралась по данным А. И. Лазарева [1].

Учет изменения теплофизических характеристик в функции от температуры производился по графикам, помещенным в книге А. Л. Немчинского [2]. Номером 3 обозначены кривые температур у поверхности и центра цилиндра, построенные по опытным данным В. М. Дегтярева [3].



Фиг. 2. Прогрев цилиндра $d = 300$ мм из стали 9Х.
 1. Изменение температуры на поверхности и в центре цилиндра, построенное по формуле (1) без учета поглощения теплоты рекристаллизации.
 2. То же с учетом поглощения теплоты рекристаллизации.
 3. Изменение температуры у поверхности и центра цилиндра, построенное по экспериментальным данным В. М. Дегтярева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изложенная методика позволяет до некоторой степени учесть влияние теплоты превращения на температурное поле в стальных телах при прогреве их под действием лучистого тепла.
2. Предложенный способ может быть рекомендован для практических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лазарев — Новые методы и приборы для исследования теплот превращения и истинной теплоемкости металлов при высоких температурах, (Диссертация), Ленинград, Институт точной механики и оптики, 1955.
2. А. Л. Немчинский — Тепловые расчеты термической обработки, ГИСЛ, 1953.
3. В. М. Дегтярев — Скоростной нагрев при термической обработке изделий крупных сечений, Машгиз, 1953.
4. Г. П. Бойков — Прогрев тел под действием лучистого тепла (сообщение первое), Изв. ТПИ, том 89, 1957, Томск.
5. Г. П. Бойков — Прогрев тел под действием лучистого тепла (сообщение второе), Изв. ТПИ, 89, 1957, Томск.