

УДК 539.3

ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2019 г. М. Я. Бровман

ОАО “Оснастка”, Тверь, Россия

e-mail: brovman@mail.ru

Поступила в редакцию 16.10.2017 г.

После доработки 02.02.2018 г.

Принята к публикации 06.02.2018 г.

В работе рассмотрена деформация ползучести при переменных температурах с учетом того, что количество тепла, которое мы можем отвести от деформируемого тела, ограничено.

Определены температурные режимы, позволяющие уменьшить деформацию ползучести при ограниченном количестве тепла, которое можно удалить от деформируемого тела.

Ключевые слова: деформация, ползучесть, напряжение, влияние температуры

DOI: 10.1134/S057232991903005X

1. Введение. Изучение процессов деформации ползучести при переменных температурах имеет большое значение при создании металлургического оборудования.

Методы расчета деформации ползучести рассмотрены в ряде работ, (см. например [1–4]).

Поскольку скорость деформации ползучести обычно значительно возрастает с повышением температуры, то многие детали металлургического оборудования: установок непрерывного литья металлов, печных конструкций, агломерационного оборудования приходится охлаждать, как правило, циркуляцией воды через деформируемые детали. Часто количество тепла, которое мы можем удалить от данной детали за определенное время, ограничено.

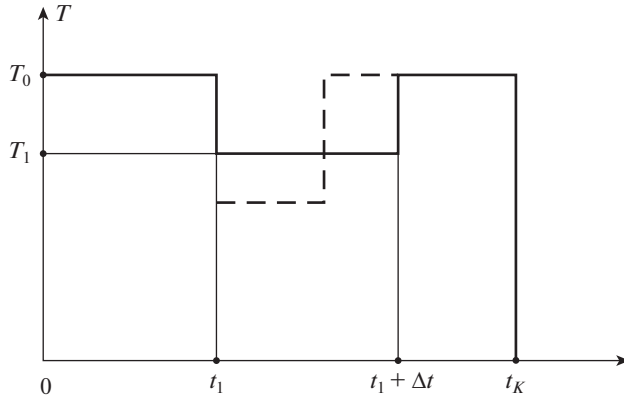
Эти ограничения определены или техническими условиями работы узлов оборудования, (например, кристаллизаторов, роликов систем вторичного охлаждения), или значительным увеличением их стоимости при увеличении расхода воды на охлаждение.

Поэтому возникает вопрос о том, как лучше использовать заданное количество тепла, которое мы можем удалить от детали за определенное время, чтобы наиболее существенно уменьшить деформацию ползучести.

В работе [5] была рассмотрена задача определения экстремального режима охлаждения, т.е. изменения температуры $T(t)$, как функции времени t , обеспечивающей минимум величины деформации ползучести.

В данной работе рассмотрена задача поиска минимума величины деформации ползучести при частном виде функции $T(t)$, а именно при постоянных величинах температуры в течение интервала времени $0 \leq t \leq t_1$, см. фиг. 1. До момента t_1 температура постоянна и равна T_0 .

При тепловом равновесии деталь получает количество тепловой энергии Q , которое удаляется за счет конвекции.



Фиг. 1

Уравнение баланса тепла в условиях конвективного теплообмена можно записать в виде:

$$Q = \alpha_0 F (T_0 - T_c) t_1 \quad (1.1)$$

где α_0 — коэффициент теплоотдачи Вт/м² · с · гр,

F — площадь теплообмена (м²),

T_0 — постоянная температура (град),

T_c — температура окружающей среды (величина Q/t_1 — это количество тепла, удаляемого в единицу времени).

В момент t_1 включают охлаждение, что обеспечивает быстрое уменьшение температуры на величину ΔT .

Примем, что

$$Q - \Delta Q = \alpha_0 F (T_0 - T_c - \Delta T) (t_2 - t_1)$$

где Q — количество тепла, отведенное от тела до момента выключения охлаждения $t = t_2$, (т.е. за время $\Delta t = t - t_1$).

Запишем величину ΔQ в виде

$$\Delta Q = \alpha_0 F \Delta T \Delta t \quad (1.2)$$

При заданном количестве изменения тепловой энергии (за счет охлаждения):

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{\alpha_0 F \Delta t} \quad (1.3)$$

Формулы (1.1) и (1.3) можно использовать обычно при $T < 800^\circ\text{C}$, при более высоких температурах тепловой поток пропорционален величинам T^4 , где T — абсолютная температура.

Приняв зависимость (1.3), полагаем, что можно при определенной величине $\Delta Q = \text{const}$, уменьшить время Δt , чтобы усилить эффект охлаждения, увеличив ΔT , но на более короткое время, как показано на фиг. 1 штрихами.

Вопрос в том, как это повлияет на общую величину деформации ползучести, достигнутую за время t_k .

В момент t_2 — охлаждение выключают и при $t_2 < t \leq t_k$ — деформация продолжается при $T = T_0$.

Относительно выбора именно такого “ступенчатого” режима изменения температура (см. фиг. 1) по сравнению с произвольной функцией $T(t)$, см. [5], укажем, что он является наиболее простым для реализации в промышленности и требует значительно меньших затрат, (по сравнению с точной функцией $T(t)$, соответствующей экстремуму).

Действительно, достаточно использовать реле времени для включения системы охлаждения в момент t_1 и ее выключения при $t = t_2$.

Поэтому в данной работе ограничимся рассмотрением процесса ползучести при таком температурном режиме для решения вопросов об его эффективности и о выборе оптимального момента включения охлаждения с целью максимально возможного уменьшения деформации ползучести.

2. Основные уравнения. Для определения деформации ползучести используем известное, см. [1–3], уравнение

$$p^\alpha p = f(\sigma) \exp(\gamma T) \quad (2.1)$$

где p — деформация ползучести,

σ — напряжение при одноосном напряженном состоянии,

α и γ — величины, для данного металла, сплава постоянные;

$F(\sigma)$ — функция, определяющая зависимость скорости деформации от напряжения.

Зависимость (2.1) применима с определенной точностью при одноосном напряженном состоянии. Ее можно использовать, как приближенную для некоторых условий, например тонкостенных труб, нагруженных внутренним давлением, колосников обжиговых машин, деталей систем вторичного экранного охлаждения установок непрерывного литья металлов и так далее.

Более точные зависимости деформации ползучести от напряжений и температуры приведены в работах [1–3].

Определению деформации при напряжениях, переменных по объему деформируемого тела, предполагается посвятить отдельную работу.

Допустим, что одноосная деформация $p(t)$ происходит при постоянных температуре T_0 и напряжении, а в течение времени t_k . За это время произойдет деформация ползучести, равная

$$p_0(t_k) = [(\alpha + 1) f(\sigma) \exp(\gamma T_0) t_k]^\beta \quad (2.2)$$

$$\beta = 1/(\alpha + 1)$$

Если температура постоянна, а напряжение задано, как функция $\sigma(t)$, то

$$p_0(t_k) = \left[(\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) \int_0^{t_k} f(\sigma) dt \right]^\beta \quad (2.3)$$

Теперь рассмотрим процесс, при котором температура остается постоянной при $0 \leq t \leq t_1$, а затем уменьшается на величину ΔT . В течение времени $t_1 \leq t \leq t_2$ она остается постоянной и равной $T_0 - \Delta T$, см. фиг. 1, где $\Delta t = t_1 - t_2$. При $t = t_1 + \Delta t$ охлаждение прекращают, и температура вновь возрастает до величины T_0 . Такой же она остается в течение времени $(t_k - t_2)$, до конца процесса деформации.

За время t_1 будет достигнута деформация p_1 :

$$[p_1(t_1)]^{\alpha+1} = (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) \int_0^{t_1} f(\sigma) dt \quad (2.4)$$

Эта функция далее возрастет и при $t = t_2$ достигнет величины

$$[p_2(t_2)]^{\alpha+1} = (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) \left[\int_0^{t_1} f(\sigma) dt + \exp(-\gamma \Delta t) \int_{t_1}^{t_2} f(\sigma) dt \right]$$

После выключения охлаждения деформация при $t_2 \leq t \leq t_k$ еще возрастет и достигнет конечной величины

$$[p_k(t_k)]^{\alpha+1} = (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) \left[\int_0^{t_1} f(\sigma) dt + \exp(-\gamma \Delta t) \int_{t_1}^{t_2} f(\sigma) dt \int_{t_k}^{t_k} f(\sigma) dt \right]$$

Это выражение можно записать в виде

$$[p_k(t_k)]^{\alpha+1} = (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) \left[\int_0^{t_k} f(\sigma) dt - [1 - \exp(-\gamma \Delta t)] \int_{t_1}^{t_2} f(\sigma) dt \right] \text{ или} \\ p_k(t_k) = \left\{ [p_0(t_k)]^{\alpha+1} - (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) [1 - \exp(-\gamma \Delta t)] \int_{t_1}^{t_2} f(\sigma) dt \right\}^{\beta} \quad (2.5)$$

При малых величинах $\gamma \Delta T$, можно принять $\exp(-\gamma \Delta T) \approx 1 - (\gamma \Delta T)$. Во многих случаях расчеты определяют величины $t_2 > t_k$, что по условиям задачи не возможно, (t_k – полное время деформации).

В этих случаях в формулы входит только одна неизвестная величина t_1 и после начала охлаждения его реализуют все время до конца процесса деформации. В таких задачах конечная деформация равна:

$$p_k(t_k) = \left\{ (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) \left[\int_0^{t_1} f(\sigma) dt + \exp(-\gamma \Delta t) \int_{t_1}^{t_k} f(\sigma) dt \right] \right\}^{\beta} \quad (2.6)$$

Такие случаи имеют место при постоянных или монотонно возрастающих напряжениях в течение всего времени деформации, (другие случаи предполагается рассмотреть в отдельной работе).

Далее выразим величину ΔT , как функцию $\Delta t = t_k - t_1$. Если перейти к безразмерным переменным $u_1 = t_1/t_k$, $u = t/t_k$, также использовать безразмерную постоянную $B = \gamma \Delta Q / (\alpha_0 F t_k)$, то для деформируемой детали, то вместо (2.6) получим зависимость

$$p_k(t_k) = \left\{ (\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) t_k \left[\int_0^{u_1} f(\sigma) du + \exp\left(-\frac{B}{1-u_1}\right) \int_{u_1}^{1.0} f(\sigma) du \right] \right\}^{\beta} \quad (2.7)$$

3. Примеры изменения напряжений. При постоянном напряжении из формулы (2.7) получим функцию:

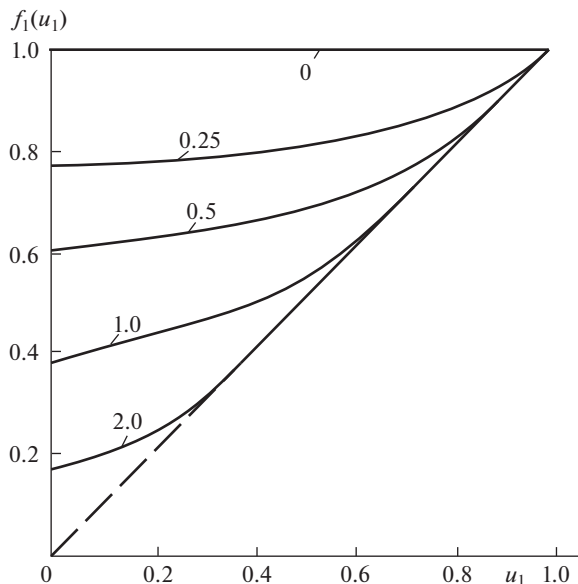
$$p_k(t_k) = [(\alpha + 1) \exp(\gamma T_0) f(\sigma) t_k f_1(u_1)]^{\beta} \quad (3.1)$$

где функция

$$f_1(u_1) = u_1 + (1 - u_1) \exp\left(-\frac{B}{1-u_1}\right) \quad (3.2)$$

Графики функций $f(u_1)$ при некоторых величинах постоянной B приведены на фиг. 2 (величины B указаны индексами у кривых).

Понятно, что при $B = 0$, $f_1(u_1) = 1.0$, а если $B \rightarrow \infty$, то график $f(u_1)$ приближается к прямой $f(u_1) = u_1$, показанной на фиг. 2 штрихами. Если при $0 \leq u_1 \leq 1.0$ производная



Фиг. 2

$df_1(u_1)/du_1 > 0$ и минимальное значение функция $f(u_1)$ принимает, при $u_1 = 0$, то в этом целесообразно включать охлаждение в начале процесса деформации.

Например, если $B = 1.0$, то при $u_1 = 0, f_1(0) = 0.367$ и уменьшение деформации ползучести определено величиной $0.367^\beta = 0.715$ (при $\beta = 0.357$; $\alpha = 1.8$) и при $u_1 = 0$ охлаждение обеспечит уменьшение деформации ползучести на $\sim 2.9\%$. Такая величина незначительна и режим охлаждения не эффективен.

Усиление охлаждения до величины, соответствующей параметру $B = 2.0$ уменьшению функции $f_1(0)$ до $f_1(0) = 0.135$, а величина $[f_1(0)]^{0.357} \approx 0.51$ уменьшится почти в два раза. При $B < 0.5$ влияние охлаждения на деформацию незначительно.

Теперь рассмотрим случай, когда напряжение не остается в процессе деформации постоянным, а возрастает согласно функции

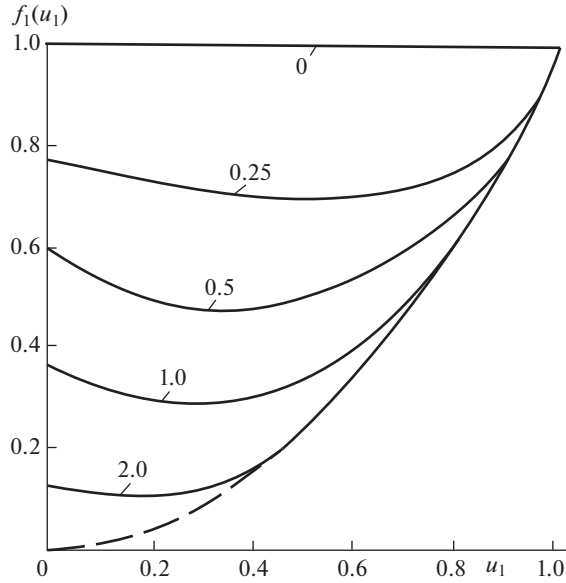
$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma_m}{t_k}\right)^n t^n \quad (3.3)$$

где Q_m и t_k характеризуют максимальное напряжение и время процесса за время t_1 будет достигнута деформация $p_1(t_1)$ (при температуре T_0):

$$[p_1(t_1)]^{\alpha+1} = \left(\frac{\sigma_n}{t_1}\right)^n (\alpha+1) \exp(\gamma T_0) \frac{t_1^{n+1}}{(n+1)}$$

Далее произойдет охлаждение деформируемого тела на ΔT и в момент времени $t_2 > t_1$ деформация ползучести достигнет величины $p_2(t_2)$, где

$$[p_2(t_2)]^{\alpha+1} = \frac{(\alpha+1)}{(n+1)} \left(\frac{\sigma_n}{t_k}\right)^n \exp(\gamma T_0) [t_1^{n+1} + \exp(-\gamma \Delta T) (t_2^{n+1} - t_1^{n+1})]$$



Фиг. 3

Конечная деформация при $t = t_k$ ($t_k \geq t_2$) равна в этом случае

$$p_k(t_k) = \left\{ \frac{(\alpha + 1) \left(\frac{\sigma_n}{t_k} \right)^n \exp(\gamma T_0) [t_1^{n+1} + \exp(-\gamma \Delta T) (t_k^{n+1} - t_2^{n+1})] \right\}^\beta \quad (3.4)$$

Как правило, в задачах, в которых напряжение в течение всего времени монотонно возрастает, $t_2 \geq t_k$ и следует принимать в (3.4) $t_2 = t_k$. В этом случае можно выразить величину деформации в виде

$$p_k(t_k) = \left[\frac{(\alpha + 1) \left(\frac{\sigma_n}{t_k} \right)^n \exp(\gamma T_0) t_1^{n+1} f(u_1) \right]^\beta \quad (3.5)$$

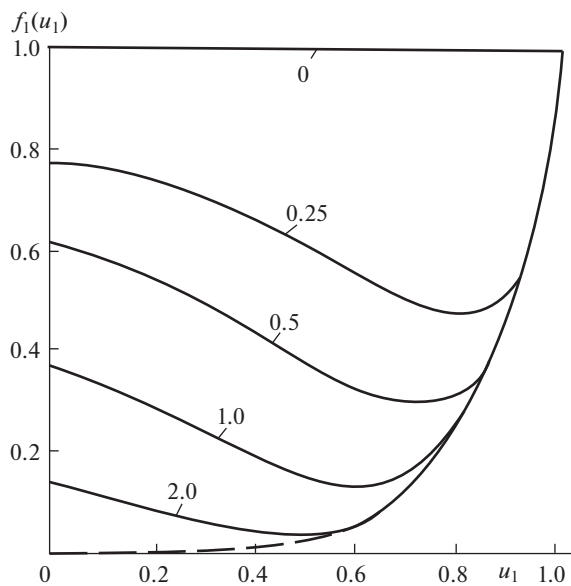
$$f_1(u_1) = u_1^{n+1} + \exp\left(-\frac{B}{1-u_1}\right) (1 - u_1^{n+1}) \quad (3.6)$$

На фиг. 3 приведены графики функций $f(u_1)$ при $n = 1.0$ и величинах B , указанных индексами у кривых.

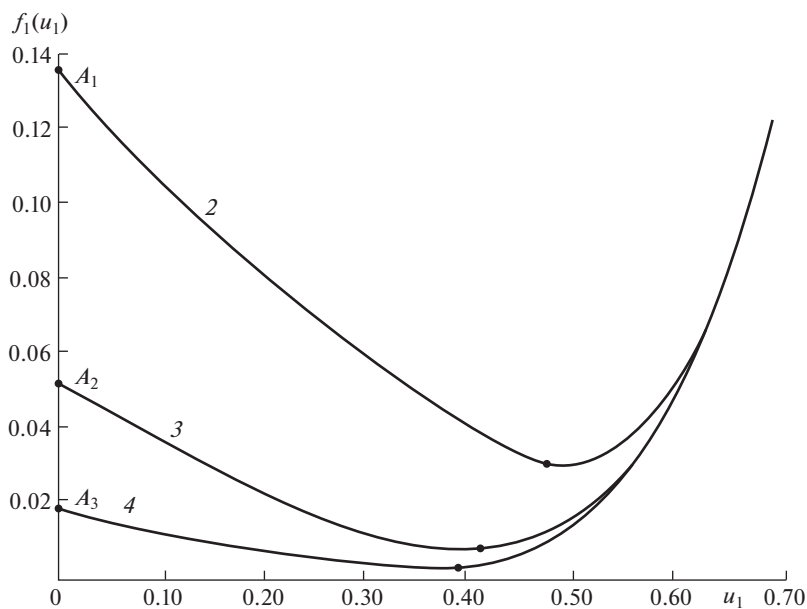
На фиг. 4 приведены графики $f_1(u_1)$ при $n = 5$ (на фиг. 4 при $B = 0.25; 0.50; 0.10; 0.20$, а на фиг. 5 при $B = 2.0; 3.0$ и 4.0 в увеличенном масштабе).

Чем больше величина B , тем меньше величины u_1 при которых имеет место минимум функции $f(u_1)$, а при $B \rightarrow \infty$ $u_1 \rightarrow 0$.

Следовательно, чем больше “ n ” и “ B ” тем раньше следует включить охлаждение. Однако, при $n = 1.0$ величина “выигрыша” незначительна, например, если $n = 1.0$ и $B = 2.0$, то $f_1(0) = 0.1352$, а в точке минимума при $u_1 = 0.17$, $f_1(0.17) = 0.110$. Отношение величин деформации при $\beta = 2.8$ и $\beta = 0$ равно $(0.1352/0.110)^{0.35} = 1.07$ и такое различие не существенно, поскольку разброс величин деформации намного больше. При $n < 5$ можно принимать $u_1 = 0$, т.е. начинать охлаждение в момент начала процес-



Фиг. 4



Фиг. 5

са деформации. Но с увеличением показателя степени “ n ” в формуле (3.3) влияние выбора величины u_1 усиливается.

Это видно из графиков, приведенных фиг. 4 и 5. Например, при $n = 5$, $B = 2.5$ отношение значений функции $f_1(u_1)$ при $u_1 = 0$ и $u_1 = 50$ равно $0.135/0.031 = 4.35$ и

$4.35^{\beta} \approx 1.63$ и уменьшение деформации ползучести в 1.63 раза может оказаться значительным.

Согласно расчетам, выбор величины u_1 при $n < 5.0$ оказывает незначительное влияние на величину $f_1(u_1)$. Поэтому можно в этих случаях принимать $u_1 = 0$ и реализовать охлаждение детали в течение всего времени деформации.

Но при $n \geq 5$ влияние величины u_1 на функцию $f_1(u_1)$ усиливается.

Приведем пример охлаждения пластины экранного вторичного охлаждения установки непрерывного литья стали 91 кг из стали 08Ю за время $t_k = 5400$ с (90 мин), при величине тепловой энергии $\Delta Q = 2.25 \cdot 10^7$ Дж.

При величине $\alpha = 1.8$; $\gamma = 0.01$ гр $^{-1}$ и $n = 5.0$ выберем величину $a_0 = 22$ Вт/(м 2 · град), по данным ([7] стр. 99) для теплообмена без обдува детали воздухом.

Определим для этих условий параметр В

$$B = \frac{0.01 \cdot 2.25 \cdot 10^7}{22 \cdot 0.5 \cdot 5400} = 3.79$$

Если использовать охлаждение в течение всего времени t_k , т.е. при $t_1 = 0$, $u_1 = 0$, то функция $f(0) = \exp(-3.79) = 0.0226$, а в точке минимума функции $f(u_1)$ при $u_1 = 0.41$ $f_1(0.41) = 0.0027$.

Такие результаты означают, что при использовании охлаждения в течение всего времени деформации (при $t_1 = 0$) величину деформации ползучести можно уменьшить в $(0.0226)^{\beta} = (0.0226)^{-0.35} = 3.6$ раза.

Если же начать охлаждение при $t_1 = 0.14 \cdot 5400 = 2214$ с, то за время $(1.00 - 0.41)t_k = 3186$ с можно уменьшить величину деформации ползучести $(0.0027)^{-0.35} = 7.14$ раза. Отношение величин $7.14/3.6 = 1.98$, что определяет возможный выигрыш в уменьшении деформации ползучести.

В каждом конкретном случае следует решать вопрос о выборе режима охлаждения детали.

Используя формулу (1.3), можно определить, что при времени охлаждения $t_k = 5400$ с, $\alpha_0 = 22$ Вт/(м 2 град), $F = 0.5$ м 2 можно уменьшить температуру детали на величину

$$\Delta T = \frac{2.25 \cdot 10^7}{22 \cdot 0.5 \cdot 5400} = 378.8^{\circ}\text{C}$$

А при включении системы охлаждения в момент $t_1 = 2214$ с:

$$\Delta T = \frac{2.25 \cdot 10^7}{22 \cdot 0.5 \cdot (5400 - 2214)} 642^{\circ}\text{C}$$

Если начальная температура была равна 750°C , то в первом случае температура будет равна 371.2°C в течение всего времени t_k , а во втором при $t_1 = 2214$ с ее можно уменьшить до 108°C , что позволит почти в два раза уменьшить полную величину деформации ползучести, (по сравнению с деформацией, достигнутой при использовании охлаждения в течение всего времени деформации).

4. Усовершенствование способов уменьшения деформации ползучести. Уменьшение деформаций ползучести весьма актуально в черной и цветной металлургии при эксплуатации агломерационных и обжиговых машин, печного оборудования, установок непрерывного литья и других устройств. Одним из основных способов уменьшения такой деформации является охлаждение деталей водой, расход которой в черной и цветной металлургии очень велик. Между тем, дефицит воды в мире значительный и

достигает 1 230 млрд в год. Конечно, РФ имеет большие запасы пресной воды: 22–25% от мирового объема [6], занимая по ним второе место в мире, (уступая только Бразилии), однако эти ресурсы распределены неравномерно и во многих областях РФ малое количество воды создает серьезные трудности. Поэтому в одном из постановлений государственной думы РФ отмечено, что “неблагоприятное положение с развитием питьевого водоснабжения создает угрозу национальной безопасности РФ”, см. [8].

Помимо дефицита воды возникает другая проблема — отложение солей (кальция, магния и так далее) на поверхностях каналов для циркуляции воды. Уже слой накипи 1–2 мм может уменьшить тепловой поток на 50% и более. Это часто приводит к повышению температуры, резкому ускорению процесса ползучести и выходу оборудования из строя.

Приходится строить специальные цеха для химической очистки поверхностей каналов для движения воды воздействием кислот или щелочей [9, 10], что резко увеличивает затраты (и создает проблемы с соблюдением экологических требований). Во многих работах даны рекомендации: повысить требования к качеству охлаждающей воды, (например, снизить ее общую и карбонатную жесткость (см. [6] с. 310)). Повысить требования, конечно, можно но, как действовать металлургам, в распоряжении которых имеется только определенная вода, а затраты на ее химическую очистку очень велики.

Оптимальное решение этой проблемы дает система охлаждения с постоянным количеством охлаждающей жидкости (обычно воды), циркулирующей по замкнутому контуру [11]. При этом происходит нагрев, обычно если температура окружающей среды 20°, то можно допустить температуры до 90–95°. При нагреве на 70°С килограмм воды обеспечивает удаление тепла $2.94 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Поскольку этот объем постоянный отложения солей почти не происходит (а кроме того, однократная химическая очистка определенного количества воды допустима).

При этом возникает задача о том, можно ли оптимально использовать момент начала охлаждения.

В [11] предусмотрено использование двух контуров: в первом по замкнутой траектории движется жидкость (вода), а во втором — воздух. Часть труб является теплообменником, где тепло (частично или полностью) передается от воды к воздуху, (который движется по трубам теплообменника). Нагретый воздух удаляют в атмосферу, но конечно, лучше использовать его (для отопления зданий, в сушильных агрегатах, печах и так далее).

Никакого загрязнения воздуха или воды не происходит. Известно, что аварийные ситуации с прекращением водоснабжения цехов приводят к выходу из строя десятков тонн оборудования из-за деформации ползучести. Но при циркуляции охладителя по замкнутому контуру такого не произойдет.

При использовании резервных аккумуляторов можно обеспечить работу системы охлаждения даже и в случае отключения электричества. Оптимизация режимов охлаждения должна в каждом случае определяться с учетом функции, определяющей изменение напряжений в деформируемых деталях.

Отметим, что в ряде других случаев (и задач) обеспечение охлаждения деталей или узлов оборудования связано со значительными трудностями. Так А.А. Абрикосов указывал [12]: “... в обычном магните энергия тока в конечном итоге тратится на разогрев обмотки. Из-за этого приходится делать громоздкую и дорогостоящую систему охлаждения. Именно это обстоятельство ограничивает возможности электромагнитов с полями до 5–6 Тл.

Известно также, (из рекламного сообщения), что фирма “Unilabel AG Minimal-schmiertechnik” разрабатывает “системы охлаждения с минимальным количеством охлаждающего средства”, но конкретной информации по ним нет. Но видно, что вопросы охлаждения с минимизацией расхода охладителя становятся все более важными.

Рассмотренные здесь простые режимы изменения температуры не являются экстремальными, но могут оказаться полезными в ряде случаев и их легко реализовать при создании систем охлаждения металлургического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. *Локощенко А.М.* Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. М.: МГИУ, 2007. 264 с.
3. *Аршакуни А.Л., Локощенко А.М., Киселевский В.Н. и др.* Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник под ред. С.А. Шестерикова. М.: Машиностроение, 1983. 101 с.
4. *Бровман М.Я.* Экспериментальное исследование ползучести при высоких температурах // Проблемы прочности. 1979. № 8. С. 77–79.
5. *Бровман М.Я.* Экстремальные температурные режимы при ползучести // Проблемы прочности. 1982. № 6. С. 41–43.
6. *Бровман М.Я.* Кристаллизаторы установок непрерывного литья металлов. М.: Теплотехник. 2011. 425 с.
7. *Самойлович Ю.А., Крулевецкий С.А., Горяинов В.А., Кабаков З.К.* Тепловые процессы при непрерывном литье стали. М.: Металлургия. 1982. 152 с.
8. *Черников Н.А., Бегунов П.П., Дюба К.М.* Еще раз к вопросу о законодательной базе в области водоснабжения и водоотведения // Вода и экология. Проблемы и решения. 2012. № 3. С. 6–12.
9. *Хребто В.Е., Городецкий М.А., Боровков М.В. и др.* Анализ причин выхода из строя роликовых секций и блоков // В сб. Пути развития машиностроительного комплекса. Прокатные валки. Магнитогорск. М.М.К. 1996. С. 201–204.
10. *Хребто В.Е., Городецкий М.А., Боровков М.В. и др.* Исследование стойкости роликов МНЛЗ из различных марок стали // В сб. “Пути развития машиностроительного комплекса”. Прокатные валки. Магнитогорск. М.М.К. 1996. С. 201–204.
11. Патент РФ 120025. Система охлаждения металлургических агрегатов / М.Я. Бровман // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 25. С. 18.
12. *Абрикосов А.* Сверхпроводимость: История. Современные представления, последние успехи // Квант. 2017. № 7. С. 9–19.