

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ ЗАКОН ОХЛАЖДЕНИЯ ПОКОВОК В ТЕРМОСЕ

А.Д. Шабуров, Д.А. Мирзаев, И.В. Мальцев

THERMOPHYSICAL LAW OF COOLING OF FORGINGS IN A THERMOS

A.D. Shaburov, D.A. Mirzayev, I.V. Maltsev

Рассмотрены условия теплообмена и закон охлаждения поковок в термосах – теплоизолированных коробах, которые начинают использовать на металлургических комбинатах для замедленного охлаждения поковок после их противофлюккенного отжига в печах с целью уменьшения длительности последнего. Сделан расчет коэффициента теплоотдачи в двух вариантах: без учета и с учетом теплопроводности через металлические поперечины, скрепляющие стенки, между которыми заложена теплоизоляция. Оказалось, что отмеченная теплопроводность в три раза увеличивает коэффициент теплоотдачи $\alpha_{эфф}$ от поверхности поковок. На основании кривых охлаждения поковок и установленного закона охлаждения найдено экспериментальное значение $\alpha_{эфф}$, оказавшееся весьма близким к расчетному. Полученные результаты будут использованы для разработки технологии противофлюккенной обработки поковок в термосах на ОАО «Уральская кузница».

Ключевые слова: термос, коэффициент теплоотдачи, уравнение охлаждения.

Conditions of heat transfer and the law of cooling of forgings in thermoses are considered. (Thermoses are heat-insulated boxes that are beginning to be used at metallurgical plants for slower cooling of forgings after furnace anti-flake annealing to reduce the duration of the latter.) Heat transfer coefficient is calculated in two versions: without and with allowance for heat conduction through the metal of the cross-tie wail, between which lies insulation. It was found that this heat conduction increases the heat transfer coefficient from the surface of forgings α_{eff} by a factor of three. Based on cooling curves of forgings and established law of cooling the experimental value of α_{eff} was found, which proved to be very close to the calculated one. These results will be used to develop the technology of anti-flake treatment of forgings in thermoses at JSC «Urals Stampings».

Keywords: thermos, heat-transfer coefficient, cooling law.

1. Введение

Как известно [1], поковки, производимые на металлургических предприятиях, непосредственно после окончанияковки подвергаются противофлюккенной термообработке, причем самой длительной операцией является отжиг при температуре $A_{c1} - (20...40)^\circ\text{C}$. Он необходим для диффузионного выделения водорода, а длительность его зависит от диаметра поковок и может составлять более 100 часов. В силу нехватки нагревательных печей для многих предприятий необходимость проведения отжига существенно уменьшает производительность кузнечно-прессовых цехов. Возникла задача сокращения длительности печного нагрева, которую можно решать несколькими путями. Один из них – уменьшение концентрации водорода в ходе выплавки, например, с применением вакуумирования, но в этом случае далеко не всегда удается получить безопасную концентрацию во-

дорода, поэтому отжиг во многих случаях все-таки приходится проводить.

Другой способ, который начинает использоваться в ОАО «Уральская кузница», заключается в уменьшении длительности изотермической выдержки в печи за счет последующего замедленного охлаждения в термосах, или колпаках. В этом случае значительная часть водорода выделяется из поковок в процессе замедленного охлаждения в термосе после отжига. По существу, этот вариант в значительной мере повторяет существовавший до 1950-х годов метод замедленного охлаждения поковок в колодцах под слоем песка, гравия, шлаковаты и т. д. без использования изотермических выдержек. Позднее от этого метода отказались, но не в силу его малой эффективности, а потому что он приводил к транспортным и экологическим проблемам в цехах.

В настоящее время используют не колодцы или ямы, а теплоизолированные колпаки, которые

просто надевают на принесенные из печи и уложенные в бугеля заготовки. Для количественной оценки степени сокращения изотермической выдержки при использовании термоса необходимо рассмотреть теплотехническую проблему охлаждения поковок в термосе, чему и посвящена данная работа.

2. Расчетная часть

Будем считать, что поковки перенесены из печи на площадку с теплоизолированным полом, уложены в бугеля и закрываются крышкой. Начинается теплообмен (рис. 1). В силу малой скорости охлаждения вскоре в термосе устанавливается стационарный режим теплообмена [2], при котором потоки тепла от нагретого металла через различные среды равны между собой:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4. \quad (1)$$

Здесь Q_1 - количество теплоты, переходящее от поковок к воздуху внутри термоса; Q_2 - количество теплоты, передающееся от воздуха к внутренней поверхности крышки; Q_3 реализуется в форме теплопроводности через крышку термоса толщиной h и, наконец, поток Q_4 отводит тепло от внешней крышки термоса в окружающую атмосферу. Запишем выражения для тепловых потоков:

$$Q_1 = \alpha_1 S_m (T_m - T_b); \quad Q_2 = \alpha_2 S_t (T_b - T_{n,1});$$

$$Q_3 = \frac{\lambda_t}{h} S_t (T_{n,1} - T_{n,2}); \quad Q_4 = \alpha_3 S_t (T_{n,2} - T_a), \quad (2)$$

где α_1 , α_2 и α_3 - коэффициенты теплоотдачи на границах металл - воздух, воздух - внутренняя поверхность крышки термоса и наружная крышка - атмосфера цеха соответственно; λ_t - коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала крышки; S_m и S_t - площади поверхности раздела металл - воздух и внешней поверхности термоса. Обозначения температур в выражениях (2) имеют следующий смысл: T_m , T_b , $T_{n,1}$, а также $T_{n,2}$, T_a - соответственно температуры с двух сторон поверхностей раздела металл - воздух, воздух-внутренняя поверхность крышки и внешняя

поверхность крышки - атмосфера цеха соответственно.

Поочередно приравнивая потоки, можно последовательно выражать одну температуру через другую. Например, приравняем поток теплоты от поверхности термоса в атмосферу к потоку, переносимому за счет теплопроводности через стенку термоса:

$$\lambda_t S_t \frac{T_{n,1} - T_{n,2}}{h} = \alpha_3 S_t (T_{n,2} - T_a), \quad (3)$$

откуда следует связь $T_{n,1}$ с $T_{n,2}$ и T_a :

$$T_{n,1} = T_{n,2} \left(1 + \frac{\alpha_3 h}{\lambda_t} \right) - \frac{\alpha_3 h}{\lambda_t} T_a. \quad (4)$$

Продолжая эту цепочку рассуждений, удается выразить $T_{n,2}$ через температуру поверхности поковок и найти закон охлаждения поверхности металла в форме

$$Q = \alpha_{\text{эфф}} S_t (T_m - T_a), \quad (5)$$

очень напоминающей закон охлаждения поковок на воздухе [2, 3], но вместо соответствующего коэффициента теплообмена в нашей формуле стоит эффективный коэффициент теплообмена

$$\alpha_{\text{эфф}} = \frac{1}{\frac{S_t}{S_m} \cdot \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{h}{\lambda_t}}. \quad (6)$$

Как и следовало ожидать, эффективный коэффициент теплообмена зависит от всех теплофизических параметров сред и уменьшается с ростом толщины стенки термоса. Чтобы оценить $\alpha_{\text{эфф}}$, примем, что теплоизолирующая стенка изготовлена из муллитокремнеземистого войлока МКРВ-200, для которого $\lambda = 0,15$ Вт/(м·К) и $h = 212$ мм. Остальные теплофизические характеристики взяты по литературным данным [2-4]: $\alpha_1 = 28$ Вт/(м²·К); $\alpha_2 = 23$ Вт/(м²·К); $\alpha_3 = 14$ Вт/(м²·К). Площади внешних поверхностей термоса и металла: $S_t = 93,05$ м² и $S_m = 38$ м². Тогда

$$\alpha_{\text{эфф}} = \frac{1}{\frac{93,05}{38} \cdot \frac{1}{28} + \frac{1}{23} + \frac{1}{14} + \frac{0,212}{0,15}} \approx 0,619 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

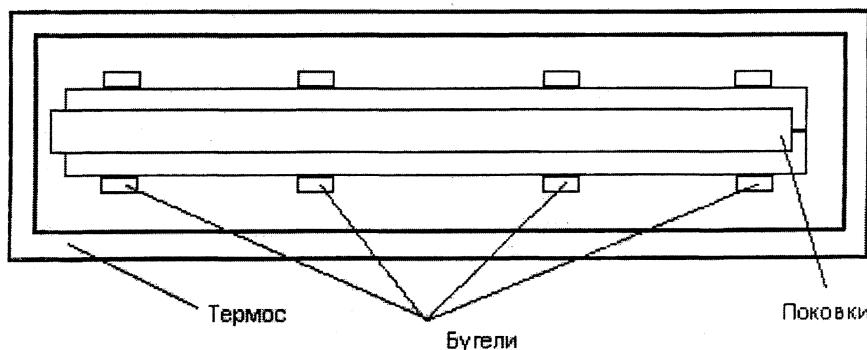


Рис. 1. Схема экспериментального термоса

Сравнивая величины $\frac{1}{\alpha_i}$ и $\frac{h_k}{\lambda_k}$, можно прийти к выводу, что на величину $\alpha_{эфф}$ основное влияние оказывают теплопроводность через стенку термоса и теплообмен внешней поверхности термоса с атмосферой.

Далее рассмотрим закон охлаждения поковок. За время охлаждения $d\tau$ поковка отдает количество теплоты $dQ = \alpha_{эфф} S_t (T_m - T_a) d\tau$, и при этом внутренняя энергия поковок понижается на величину $C_p M dT$, равную количеству отданного поковками тепла, где C_p – теплоемкость единицы массы, M – общая масса поковок. Приравняв эти выражения:

$$\alpha_{эфф} (T_m - T_a) S_t d\tau = -C_p M dT_m,$$

получим дифференциальные уравнения охлаждения всей массы поковок:

$$\frac{dT}{d\tau} = -\frac{\alpha_{эфф} S_t}{C_p M} (T_m - T_a). \quad (7)$$

Его решение имеет вид

$$T_m = T_a + (T_n - T_a) e^{-pt}, \quad (8)$$

где $p = \frac{\alpha_{эфф} S_t}{C_p M}$; T_n – начальная температура металла, выгруженного из печи, перед его помещением в термос, а T_a – температура атмосферы цеха. М.А. Михеев отметил, что в выражении для p следует добавить множитель ψ , представляющий отношение средней температуры поверхности поковок к средней температуре по объему поковок. Величина ψ является функцией от критерия Био [2, с. 243].

3. Экспериментальная часть

Для проверки правильности полученного решения в условиях цеха КПЦ были проведены эксперименты по охлаждению поковок под руководством А.В. Верещагина. Для проведения эксперимента был подготовлен опытный термос-накопитель. В качестве первичных измерительных датчиков при определении температур применялись четыре хромель-алюмелевые термопары с диаметром электродов 3,2 мм, из которых одна фиксировала интересующую нас температуру металла. Исследование было выполнено методом непрерывного термометрирования поверхностной температуры поковок. Чтобы сравнить экспериментальные результаты с полученным уравнением, кривые охлаждения были представлены в координатах $-\ln \frac{T_m - T_a}{T_n - T_a}$ – время (τ). Преобразуя

уравнение (7), найдем $pt = -\ln \frac{T_m - T_a}{T_n - T_a}$. В случае

правильности экспериментальные точки должны укладываться на прямую за исключением начального периода, когда стационарный поток ещё не установился.

Как видно из рис. 2, линейная зависимость действительно проявляется, что свидетельствует о справедливости формул (7) и (8), определяющих дифференциальный и интегральный закон охлаждения поковок. При этом для первого эксперимента $p_1 = 0,035278$, а для второго $p_2 = 0,034529 \text{ ч}^{-1}$. Значения p позволяют на основе выражения (8) найти экспериментальную величину эффективного коэффициента теплообмена:

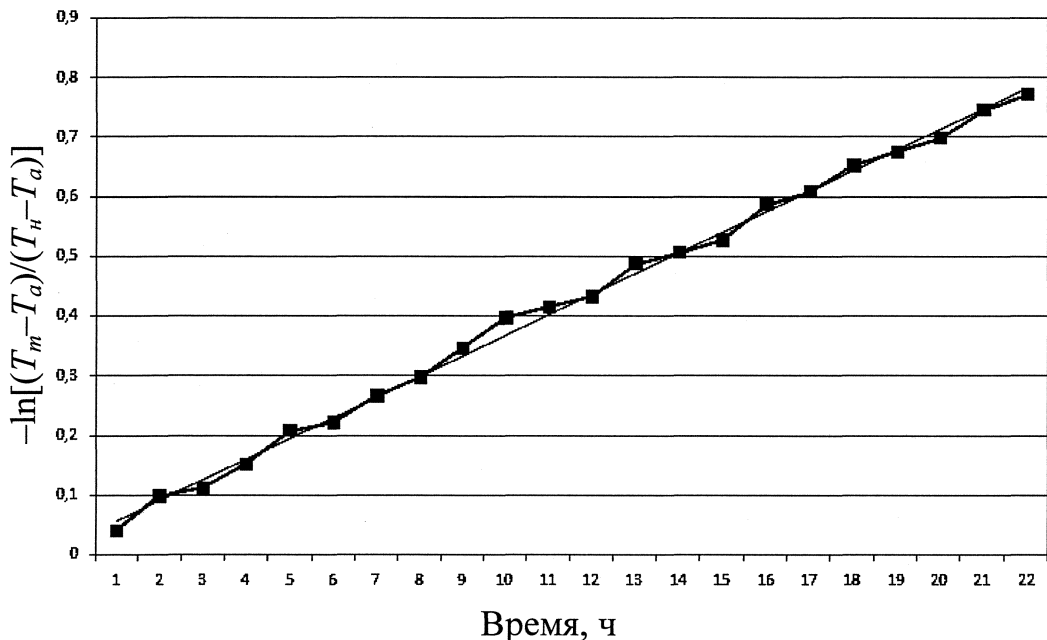


Рис. 2. Кривая охлаждения поковок, представленная в координатах $-\ln \frac{T_m - T_a}{T_n - T_a}$ – время

$$\alpha_{\text{эфф}}^{\text{экс}} = \frac{pC_p M}{\psi S_t} = \frac{0,0349 \cdot 600 \cdot 26 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 93,05 \cdot 3600} = 1,806 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (9a)$$

Оно приблизительно в три раза выше, чем расчетное значение. Безусловно, часть тепла теряется при переносе поковок из печи в термос. Но в действительности, в использованной конструкции стенки термоса, между которыми заложен теплоизолятор, укреплены стальными поперечниками из двутавров, через которые также переносится тепло, что не было учтено в расчете.

Как известно [3], термическая проводимость стальной стенки равна сумме проводимостей слоев. Поэтому в формуле (2) нужно $\frac{\lambda_t}{h}$ заменить на $\frac{\lambda_t}{h} f_1 + \frac{\lambda_d}{h} f_2$, где λ_d - коэффициент теплопроводности металла; f_1 - доля общей поверхности термоса, занятая теплоизолятором, а f_2 - металлическими двутаврами.

В использованной для опытов конструкции $f_1 = 0,989$, $f_2 = 0,011$. Приняв для λ_d значение 44 Вт/(м·К), получим:

$$\alpha_{\text{эфф}} = \frac{1}{\frac{S_t}{S_m} \cdot \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{h}{\lambda_t f_1 + \lambda_d f_2}} = \frac{1}{\frac{93,05}{38} \cdot \frac{1}{28} + \frac{1}{23} + \frac{1}{14} + \frac{0,14}{0,15 \cdot 0,989 + 44 \cdot 0,011}} \approx 1,860 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (96)$$

В этом случае согласие между теоретическим и экспериментальным коэффициентами теплообмена наиболее полное. Наибольшие потери тепла происходят из-за теплопроводности вдоль двутавровых поперечников, а затем через металлический короб термоса, который удерживает теплоизоляционный войлок. Вероятно, можно изменить конструкцию термоса так, чтобы уменьшить и эти потери тепла.

4. Выводы

Получено выражение для эффективного коэффициента теплообмена при охлаждении поковок в термосе и закон охлаждения поковок, который, во-первых, хорошо согласуется с экспериментальным, а во-вторых, позволяет рассчитывать реальную скорость охлаждения поковок различной массы. Его можно также использовать при проектировании термосов.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Литература

1. Дубовой, В.Я. Флокены в стали / В.Я. Дубовой. — М; Металлургиздат, 1950. — 332 с.
2. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н.Ю. Тайц. -М.: Металлургиздат, 1962. - 567 с.
3. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев. - М; Л.: Гос. энерг. изд-во, 1949. — 395 с.
4. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В. С. Чиркин. — М.: Атомиздат, 1968. — 484 с.

Поступила в редакцию 27 января 2010 г.