

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПРОВОЛОКИ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПОСТОЯННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Клубович^{1,2} В.В., Рубаник^{1,2} В.В.мл., Шадурский А.В³., Рубаник^{1,2} В.В.

¹ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь

²УО «Витебский государственный технологический университет»,
г. Витебск, Беларусь

³УО «Полоцкий государственный аграрно-экономический колледж»,
г. Полоцк, Беларусь
ita@vitebsk.by

В работе приведены результаты исследований процесса нагрева на воздухе предварительно отожженной при температуре 700 С проволоки из сплава с памятью формы диаметром $d = 0.6$ мм. Зона нагрева составляла 195 мм. Температуры начала и окончания обратного мартенситного превращения, измеренные методом дифференциальной сканирующей калориметрии, составляли $A_n = 59$ С, $A_k = 74$ С. В качестве источника питания использовали лабораторный стабилизированный выпрямитель ТЕС 23, работающий в режиме стабилизации тока. Диапазон изменения выходного напряжения $U = (0.1 - 30)$ В, выходного тока $I = (0.05 - 2.5)$ А. Сопротивление подводящих проводов и переходное контактное сопротивление не учитывались. Распределение температуры по длине проводника фиксировалось высокочувствительной бесконтактной тепловизионной камерой NEC TN9100. Температура окружающей среды и подводящих контактов оставалась постоянной и составляла $T_0 = 22$ С.

Для построения теплофизической и математической моделей рассмотрен одномерный случай, когда температура считается постоянной по сечению проволоки. При протекании тока по образцу учитывались следующие тепловые процессы:

- выделение в каждом элементе объема нагреваемой проволоки джоулевой теплоты, за счет которой повышается температура и реализуются фазовые превращения в сплаве;

- перенос тепловой энергии по длине образца вследствие теплопроводности;

- потери тепла с поверхности проводника в окружающее пространство в результате естественной конвекции.

Предположим, что геометрические размеры проводника сохраняются постоянными в течение процесса. Так же на данном этапе построения модели будем пренебрегать температурной зависимостью теплофизических характеристик сплава, что является основным допущением в данной работе.

С учетом изложенных выше предположений распределение температуры по длине открытой части образца, нагреваемого электрическим током, будет описываться следующим неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных:

$$a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - b(T(x,t) - T_0) + F = 0 \quad (1)$$

с начальными и краевыми условиями:

$$\begin{aligned} T(x,0) &= T_0, \quad 0 \leq x \leq l; \\ T(0,t) &= T(l,t) = T_0, \quad t > 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $T(x,t)$ – температура, x – текущая координата вдоль оси проволоки, t – время нагрева, $a = \frac{k}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, c , ρ – удельная теплоемкость и

плотность материала образца соответственно, $b = \frac{\rho h}{c\rho S}$, ρ, S – периметр и площадь поперечного сечения проволоки. h – коэффициент теплообмена с окружающей средой. Функция источника в данном случае имеет вид: $F = \frac{I^2 \rho_e}{c\rho S^2}$, где I – сила тока, ρ_e – удельное сопротивление проводника.

Решение уравнения (1), полученное методом операционного исчисления в форме преобразования Лапласа, имеет вид:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{F}{b} \left[1 - \frac{e^{\sqrt{\frac{b}{a}}x} + e^{\sqrt{\frac{b}{a}}(l-x)}}{e^{\sqrt{\frac{b}{a}}l} + 1} + \frac{2b}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m} \frac{e^{-\left(\frac{\pi^2 m^2}{l^2} + b\right)t}}{\frac{\pi^2 m^2}{l^2} + b} \left(\sin\left(m\pi \frac{x}{l}\right) + \sin\left(m\pi \left(1 - \frac{x}{l}\right)\right) \right) \right] \quad (3)$$

Расчет и анализ распределения температурного поля проводника, нагреваемого постоянным электрическим током, был выполнен в соответствии с формулой (3) в системе компьютерной алгебры Maple. Вычисление суммы ряда было организовано в виде отдельной подпрограммы, позволяющей ограничить количество слагаемых в случае достижения необходимой точности результата.

Процесс нагрева проводника сопровождается появлением кристаллов новой фазы, что приводит к изменению физических свойств сплава. В частности, входящие в (3) удельные теплоемкость и электросопротивление будут также являться функциями температуры. На рис. 1 представлена полученная на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 1 (Mettler Toledo) экспериментальная зависимость удельной теплоемкости сплава от температуры, а на рис. 2 – приближенная аппроксимация температурной зависимости удельного сопротивления [1], используемые в данной модели.

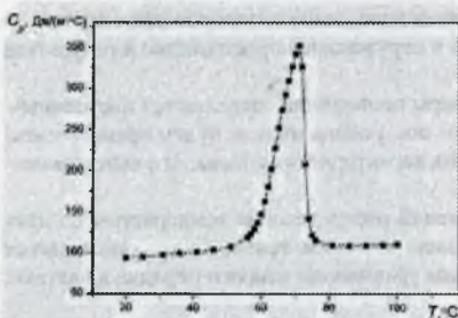


Рис. 1 – Температурная зависимость удельной теплоемкости никелида титана

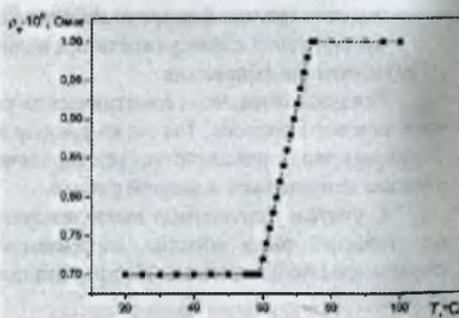


Рис. 2 – Приближенная аппроксимация температурной зависимости удельного электросопротивления

В [2] показано, что коэффициент теплоотдачи h является сложной величиной, зависящей от многих факторов: теплопроводности, теплоемкости, вязкости среды и др. Также данный параметр не является характеристикой исключительно среды, так как его величина зависит и от условий протекания процесса теплообмена. Ориентировочные значения коэффициента теплоотдачи для газов при естественной конвекции лежат в диапазоне до $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени в точке с координатой $x = l/2$. Незначительные расхождения кривых обусловлены, по-видимому, сложным характером коэффициента теплопередачи и температурной зависимости удельного сопротивления, а так же пренебрежением радиационным теплообменом с окружающей средой. Рисунок 4 отражает полученное в результате моделирования распределение температурного поля по длине проволоки с течением времени, которое с высокой точностью совпадают с результатами эксперимента.

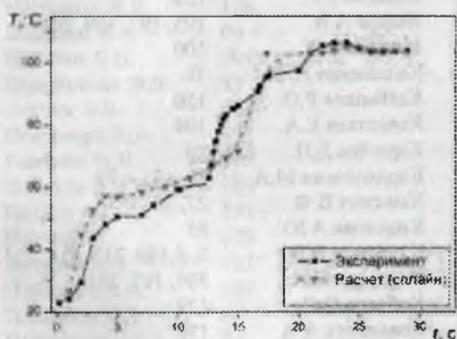


Рис. 3 – Зависимость температуры от времени в центральной части образца

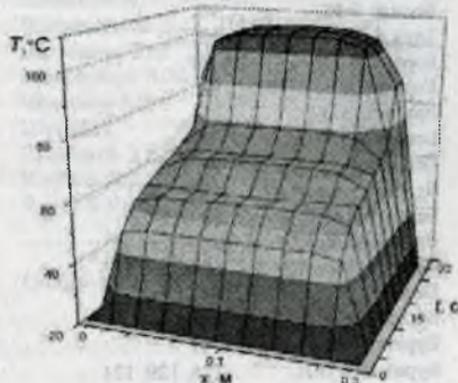


Рис. 4 – Распределение температуры по длине проволоки

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании различного рода исполнительных устройств, работающих на эффекте памяти формы, инициирование обратного фазового превращения в которых осуществляется за счет нагрева постоянным электрическим током.

Литература:

1. Материалы с эффектом памяти формы: Справ изд.: В 4 т. / Под ред. В.А. Лихачева. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. – Т. 4. – 1998. – 268 с.
2. Тимошпольский, В.И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В.И. Тимошпольский, Ю.С. Постольник, Д.Н. Андрианов. – Мн.: Бел. наука, 2005. – 560 с.