

Моделирование сопряжённого теплообмена при закалке пружин, изготавливаемых методом ВТМО

Б.Я. Бендерский,
д.т.н., проф., bib@istu.ru,
С.А. Городилов,
студ., serj1525@yandex.ru,
ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск

В настоящее время при использовании метода высокотемпературной термомеханической обработки для контроля качества структуры металла используется металлографический анализ. Использование «тяжелых» программных пакетов (CAE-технологий) позволяет контролировать структуру материала при изменении внешних параметров воздействия. Рассмотрена задача сопряженного теплообмена при охлаждении пружины в закалочной ванне. С использованием методов математического моделирования процессов гидродинамики и теплообмена, получено температурное состояние пружины при разной скорости её погружения в ванну.

Currently, when using high-temperature thermomechanical treatment method for the control of the metal structure quality using metallographic analysis. The use of "heavy" software package (CAE-technology) allows to control the structure of material when changing the external exposure parameters. The problem of conjugate heat transfer is considered when cooling the spring in a quench bath. Using the methods of mathematical modeling of the processes of hydrodynamics and heat transfer, the temperature state of the spring is obtained at different rates of its immersion in the bath.

В [1] описан следующий процесс горячей навивки пружин методом ВТМО:

1. Подача заготовки;
2. Нагрев за счет индуктора, подключенного к высокочастотной установке;
3. Навивка калиброванного прутка на оправку;
4. Закалка при подаче теплоносителя к поверхности прутка.

Выбор охлаждающей среды и способов её подачи на закаливаемую поверхность определяется как необходимостью получения заданной структуры металла, так и конкретным условиям технологического процесса обработки деталей. Из наиболее распространённых способов закалки является погружение в закалочную ванну с заранее определенным временем охлаждения, охлаждение в спрейере или совместное их использование. [2].

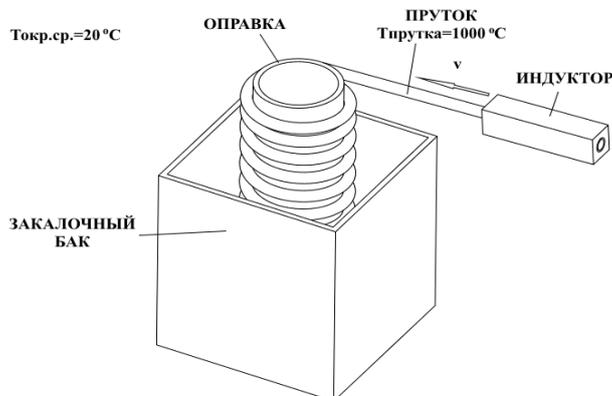


рис. 1 Схема технологического процесса изготовления пружин методом ВТМО с применением закалочной ванны

Поставлена задача определение влияния скорости погружении пружины в закалочную ванну с теплоносителем.

Пруток пружины (Т=1000 С)

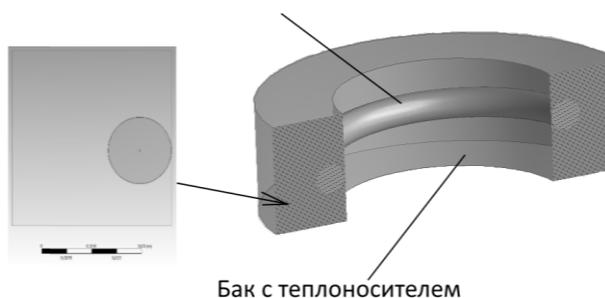


рис. 2 Перенос плоской модели задачи с трёхмерной

Рассматривается нестационарная плоская задача сопряженного теплообмена прутка пружины, погружаемого в теплоноситель. Время процесса $t=7$ с.

Допущения:

1. Используется принцип обратимости движения потока.
2. Не рассматривается вращение прутка вокруг оправки.
3. Ввиду симметрии задачи рассматривается элемент пружины в 0,5 витка.
4. Пространство закалочной ванны рассматривается, как двухфазная трехкомпонентная среда (вода, воздух, пар).
5. Не учитываются структурные переходы в материале прутка.
6. Поверхность прутка недеформируемая.
7. Поверхность оправки принимается в виде адиабатной стенки.
8. Воздух рассматривается как неразрывная среда, вода и пар – дисперсные.

В качестве теплоносителя выступают:

1. Воздух, как теплопроводный сжимаемый газ.
2. Вода, как вязкая теплопроводная несжимаемая жидкость.
3. Водяной пар, как как теплопроводный сжимаемый газ.

В качестве материала пружины применяется пружинная сталь 60С2

Теплофизические характеристики каждого материала нелинейно зависят от температуры.

Математическая постановка задачи:

Т.к. расчетная область закалочной ванны рассматривается как двухфазная трехкомпонентная среда с учетом фазового перехода, уравнение неразрывности записываются для каждого i -ого компонента:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i U_i) = \sum_{j=1}^N J_{ji}, \quad (1)$$

где:

ρ_i – плотность i -ого компонента среды, кг/м³;

U_i – скорость i -ого компонента среды, м/с.

J_{ji} – интенсивность перехода массы из j -й в i -ю в единице объема смеси в единицу времени, которая за счет столкновений и дробления частиц находится из соотношения:

$$J_{ji} = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_i \psi_{ji}, \quad (2)$$

где:

a – размер частицы, м;

ψ_{ji} – число соударений между частицами i -ой и j -ой фаз в единице объема в единицу времени.

Учитывая уравнение неразрывности (1), уравнение, выражающее закон сохранения количества движения для i -ой составляющей будет записано в виде:

$$\rho_i \frac{dU_i}{dt} = \nabla^m \pi_i^m + \rho_i g + \sum_{j=1}^N P_{ji}, \quad (3)$$

где:

m – соответствующая координата;

π_i^m – тензор поверхностных сил i -ого компонента среды, Па.

P_{ji} – интенсивность обмена импульсом между j -ой и i -ой составляющими.

С учётом принятых допущений к постановке задачи уравнение изменения энергии для i -ой составляющей запишется следующим образом:

$$\rho_i \frac{du_i}{dt} = \rho_i A_i + \rho_i Q_i + \sum_{j=1}^N J_{ji} (u_{ji} - u_i), \quad (4)$$

где:

u_{ji} – удельная внутренняя энергия массы, претерпевающей переход из j -ой в i -ую фазу и находящейся в i -ой.

A_i и Q_i представляют собой работу внутренних сил и приток тепла к i -ой фазе, отнесенные к единице составляющей массы.

Для определения температуры прутка решается уравнение теплопроводности в нестационарной плоской постановке:

$$\frac{\partial \rho_{пр} c_V T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (5)$$

где:

$\rho_{пр}$ – плотность материала проволоки, кг/м³;

T – температура, К;

x, y – координаты, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Начальные условия:

В момент времени $t=0$ пространство расчетной области занимает воздух, объемная доля воздуха $S_{возд}$, воды $S_{вод}$, пара $S_{пар}$, давление в расчетной области P_0 :

$$S_{\text{ВОЗД}}(x; y; 0) = 1; S_{\text{ВОД}}(x; y; 0) = 0; S_{\text{ПАР}}(x; y; 0) = 0; P_0(x; y; 0) = 10^5 \text{ Па.} \quad (6)$$

Начальная температура проволоки до взаимодействия с охладителем:

$$T_{\text{ПР}}(x; y; 0) = 1000 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (7)$$

Граничные условия:

Нормальная и касательная составляющие скорости на поверхности прутка, оправки равны нулю:

$$U_n = U_\tau = \text{const} = 0. \quad (8)$$

Граница поверхности оправки приняты в виде адиабатной стенки:

$$\frac{dT}{dS_{\text{ОПР}}} = \text{const} = 0. \quad (9)$$

На нижней границе «А» задаётся нормальная составляющая скорости воды:

$$U_n(A) = \text{const}, S_{\text{ВОДА}} = 1 \quad (10)$$

Давление на выходе из расчетной области по границах «Б» и «В» – атмосферное:

$$P_B = P_V = \text{const} = 10^5 \text{ Па.} \quad (11)$$

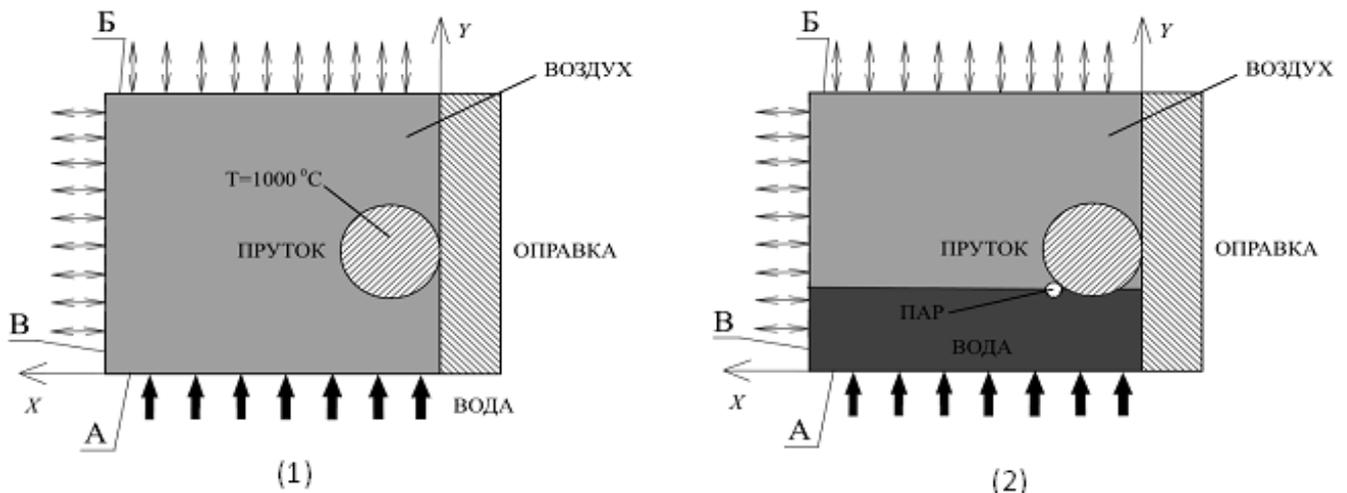


рис. 3 Теплообмен в процессе погружения пружины в закалочную ванну в начальный момент времени (1), в момент фазового перехода (2)

Для расчёта взаимодействия двух несмешиваемых сред используется метод VOF: Evaporation and Condensation [3].

Приведены результаты численного моделирования процессов взаимодействия теплоносителя с прутком пружина в закалочной ванне.

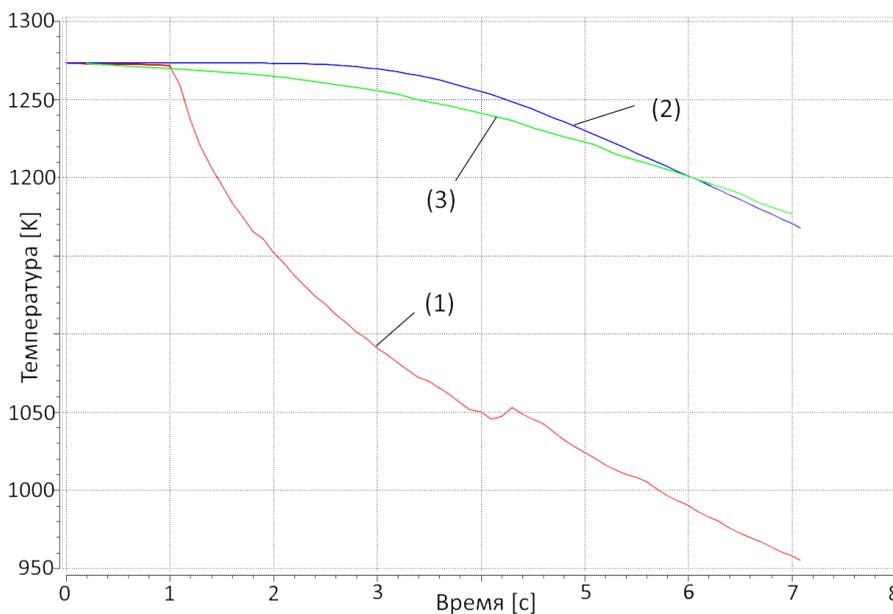


рис.4 График распределения температуры на поверхности прутка (1) от времени, температуры в ядре прутка, полученный численным моделированием (2) и экспериментальным методом (3)

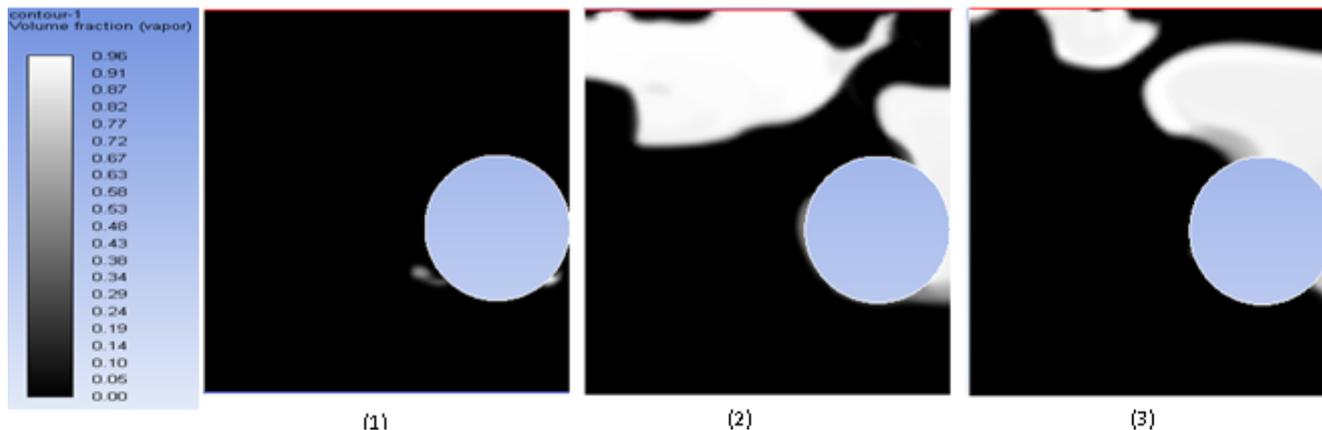


рис. 5 Распределение массовой составляющей водяного пара при условии подачи теплоносителя со скоростью $V_n=0,011$ м/с: 1) $t = 1$ с.; 2) $t = 4,3$ с.; 3) $t = 7$ с.

Экспериментальное исследование охлаждающей способности закалочной среды проходило на основании результатов закалки прутка. Для снятия кривых охлаждения использовался термозонд с наконечником из сплава ТХА(К), который нагревался в лабораторной печи до температуры 1000 °С. Далее образец охлаждался в ванне. Закалка в каждом рабочем растворе производилась до 10 раз, чтобы уменьшить ошибку проведения эксперимента. Для записи кривых охлаждения, использовался цифровой термометр “Компатон” ТЦ-3. Обработка записанных кривых охлаждения проводилась с помощью специальной программы TC-Soft, позволяющей выявить зависимость скорости охлаждения от температуры.

По итогу, температура внутри прутка, полученная при численном моделировании, дает расхождение с экспериментальным значением температуры 19,5 °С и относительной ошибкой 1,6%, что является удовлетворительным результатом.

Литература

1. Бендерский Б.Я., Копылов К.А. Моделирование процессов теплообмена при изготовлении пружин методом высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО)// Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т.13, - С. 28-36.
2. Шаврин О.И., Редькин Л.М, Термомеханическая обработка и эффект наследования термомеханического упрочнения в технологии производства пружин // Термомеханическая обработка металлических материалов. Материалы всесоюзной НТК. - М.: МДНТП. -1989.- С.15-16.
3. Foli K., Okabe T., Olhofer M. Optimization of micro heat exchanger-CFD, analytical approach and multi-objective evolutionary algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. P. 1090-1099.