

Это позволит продлить ресурс двигателя БПЛА, улучшить надежность, расширить область применения двигателя в различных типах БПЛА, включая аппараты с длительным временем полета и интенсивной нагрузкой.

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование системы управления температурой двигателя, систем выпуска и инерционного наддува для двухтактных двс с искровым зажиганием.

Список использованной литературы

1. Каталог авиационных двигателей для СЛА / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vidsverhu.ru/aviatehnika/dvigateli> – Дата доступа: 25.06.2025.
2. Черкасов А.Н., Легконогих Д.С., Зиненков Ю.В., Панов С.Ю. Двигатели для отечественных беспилотников: прошлое, настоящее и будущее // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 127–137.
3. Кочетов, Н.В., Янкевич, С.Н., Хроль, И.Н., Вальчак, И.И., Постельняк, А.А., Присяженко Г.Р. Эволюция тепловых двигателей // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – №3. – С. 99–104.
4. Справочник по элементарной математике, механике и физике. Под ред. Н.И. Кузнецова. Минск: Наука и техника, 1966. 200 с.

УДК 621.78:631.316.4:519.87

Г.И. Анискович, *канд. техн. наук, доцент*,

В.У. Бондарчук, *канд. физ.-мат. наук*,

М.А. Шевчук, *ассистент*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЛКИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ГЛУБОКОРЫХЛИТЕЛЕЙ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Ключевые слова: закалка, глубокорыхлитель, детали, охлаждение, математическая модель, теплопроводность, нестационарный процесс, теплообмен, фазовые превращения, поток воды.

Keywords: quenching, deep ripper, parts, cooling, mathematical model, thermal conductivity, unsteady process, heat transfer, phase transformations, water flow.

Аннотация: В работе представлена математическая модель охлаждения нестационарным потоком воды прямоугольного параллелепипеда представляющего собой в упрощенном виде деталь рабочего органа глубокорыхлителя в процессе импульсной закалки. Модель учитывает температурную зависимость теплофизических свойств материала, фазовые превращения с выделением скрытой теплоты, а также нелинейный радиаци-

онно-конвективный теплообмен на поверхности детали. Дополнительно учитывается изменение параметров потока охлаждающей среды.

Summary: This paper presents a mathematical model of cooling of a rectangular parallelepiped by an unsteady water flow, which, in a simplified form, represents a part of the working element of a deep ripper during impulse quenching. The model accounts for the temperature dependence of the material's thermophysical properties, phase transformations with the release of latent heat, as well as nonlinear radiative-convective heat transfer on the part's surface. Additionally, the variation of the coolant flow parameters along the product surface is taken into account.

В настоящее время для упрочнения сменных деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин нашел распространение способ импульсной закалки, который применяется как самостоятельно, так и в комбинации с другими упрочняющими способами [1-5]. Высокointенсивное охлаждение обеспечивает получение в материале деталей, благодаря быстрому прохождению температурного интервала фазового превращения, мелкодисперсных структур, наличие которых приводит к повышению конструкционной прочности закаленных стальных изделий [6-8]. При мартенситном превращении в процессе импульсной закалки в результате интенсивного водяного охлаждения со скоростями закалки выше 10 000 град/с, происходит формирование разориентированных микрообластей – фрагментов игл мартенсита размерами 0,1 – 0,4 мкм (100 – 400 нм) [1-5].

Рассматривается процесс охлаждения стального рабочего органа гребенчатого борона, нагретого до температуры закалки, при его взаимодействии с потоком воды. Для математического описания объект аппроксимируется в виде прямоугольного параллелепипеда с характерными размерами $L \times a \times b$ (рисунок 1), что позволяет сохранить геометрическую определенность задачи при приемлемом уровне сложности модели.

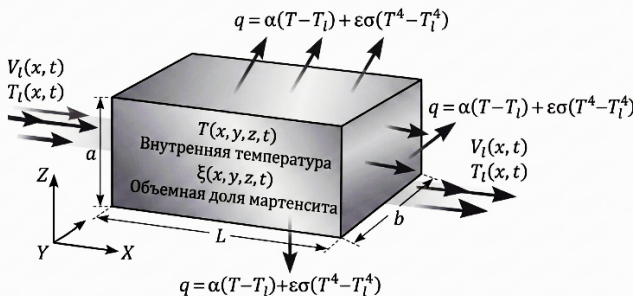


Рисунок 1 – Схема граничных условий и расчетной области для математического моделирования теплообмена

Рассматривается связанная система:

- теплопроводность в твердом теле (3D, нелинейная);
- гидродинамика и теплообмен в потоке жидкости;
- кинетика фазовых превращений в металле;
- термоупругие напряжения.

Все подсистемы взаимосвязаны через температуру, тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи.

Нелинейное уравнение теплопроводности в теле

$$\rho(T)c_{эф}(T, \xi) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] + Q_{фаз} \quad (1)$$

где $T(x, y, z, t)$ – температура, °C; $\lambda(T)$ – температуразависимая теплопроводность, Вт/(м·K); $\rho(T)$ – плотность, кг/м³; $c_{эф}$ – эффективная теплоемкость, Дж/(кг·K); ξ – доля новой фазы (мартенсита); $Q_{фаз}$ – источник теплоты фазового превращения, Вт/м³.

Эффективная теплоемкость

$$c_{эф} = c(T) + L \frac{d\xi}{dT} \quad (2)$$

где L – удельная скрытая теплота превращения, Дж/кг; $\frac{d\xi}{dT}$ – интенсивность фазового перехода, с⁻¹. Источник теплоты фазового превращения

$$Q_{фаз} = \rho L \frac{d\xi}{dt} \quad (3)$$

Кинетика образования мартенсита при достижении температуры начала превращения M_a описывается классической эмпирической зависимостью Койстинена-Марбургера [5], учитывающей долю непревращенного аустенита:

$$\xi(T) = 1 - \exp[-k(M_a - T)], \quad T < M_a, \quad (4)$$

где M_a – температура начала мартенситного превращения, °C;

k – эмпирический коэффициент.

Скорость превращения

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Суммарный удельный тепловой поток с поверхности заготовки описывается уравнением:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(x, y, z, t) \cdot (T - T_l) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_l^4) \quad (6)$$

где $\alpha(x, y, z, t)$ – локальный коэффициент теплоотдачи; T_l – температура охлаждающей жидкости, °C; ε – степень черноты поверхности металла; σ – постоянная Стефана-Больцмана; n – нормаль к поверхности.

Для определения локальных значений коэффициента теплоотдачи α необходимо рассчитать параметры движения охлаждающей среды вдоль

поверхности заготовки [6]. Математическое описание течения потока воды базируется на решении системы уравнений гидродинамики, включающей уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\rho FV)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

где V – скорость потока охлаждающей жидкости, м/с; F – вектор плотности массовых сил, м/с².

Динамика течения охлаждающей среды описывается системой уравнений Навье-Стокса в векторной форме:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{d\Pi}{F} \quad (8)$$

где t – время процесса, с; p – гидродинамическое давление, Па;

x – продольная координата вдоль направления течения, м; τ – касательное напряжение трения на поверхности раздела «металл–жидкость», Па; Π – смоченный периметр потока м;

Изменение теплосодержания потока воды вследствие конвективного теплообмена с нагретой поверхностью заготовки и внутренних источников тепла описывается уравнением энергии:

$$\rho c_l F \frac{dT_l}{dt} = \int_{\Pi} \alpha(x, y, z, t) (T_a - T_l) dS + \dot{\phi} \quad (9)$$

где c_l – удельная изобарная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); T_l – средняя массовая температура охлаждающей жидкости, К; T_a – температура поверхности детали, К; $\dot{\phi}$ – диссипативная функция, Вт/м.

Локальный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda_l}{d_{гидр}} \cdot N_{\alpha}(x, t) \quad (10)$$

где λ_l – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости, Вт/(м·К); $d_{гидр}$ – гидравлический диаметр потока (характерный линейный размер), м; $N_{\alpha}(x, t)$ – локальный критерий Нуссельта, определяющий интенсивность конвективного переноса тепла в точке с координатой x в момент времени t .

$$N_{\alpha} = f(Re, Pr, x) \quad (11)$$

где Re – критерий Рейнольдса, характеризующий режим движения жидкости;

$$Re = \frac{V d_{гидр}}{\nu(T_l)} \quad (12)$$

где $\nu(T_l)$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, зависящий от её температуры T_l , м²/с. Pr – критерий Прандтля.

Выбор конкретного вида критериальной зависимости для числа Нуссельта определяемого пороговым значением числа Рейнольдса:

$$N_{\alpha} = \begin{cases} 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}, & Re < Re_{cr} \\ 0,037 Re^{0,8} Pr^{1/3}, & Re > Re_{cr} \end{cases} \quad (13)$$

Напряженно-деформированное состояние заготовки, возникающее в процессе резкого охлаждения вследствие температурного градиента, описывается уравнением равновесия и законом Гука с учетом температурной составляющей деформации:

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (14)$$

где ∇ – оператор дивергенции; σ – тензор внутренних напряжений, Па.

Связь напряжений и деформаций

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_T) \quad (15)$$

где ε_T – температурная деформация;

D – матрица жесткости материала, Па.

$$\varepsilon_T = \alpha_T(T - T_0) \quad (16)$$

где α_T – коэффициент линейного расширения.

Распределение температурного поля в объеме рабочего органа с учетом скрытой теплоты фазовых превращений и кинетики образования мартенситной фазы описывается уравнениями:

$$\rho(T)c_{эф}(T, \xi) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) + \rho L \frac{d\xi}{dt} \quad (17)$$

$$\xi = f(T), \quad \frac{d\xi}{dt} = f'(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

где $\rho(T)$ – плотность стали, зависящая от температуры, кг/м³; $c_{эф}(T, \xi)$ – эффективная удельная теплоемкость, учитывающая теплофизические свойства фаз, Дж/(кг·К); $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К); L – удельная теплота фазового перехода (аустенит → мартенсит), Дж/кг; $\xi = f(T)$ – объемная доля образовавшейся фазы (мартенсита); $\frac{d\xi}{dt}$ – скорость фазового превращения.

Параметры потока охлаждающей жидкости определяются из системы уравнений неразрывности, движения и энергии:

$$\frac{\partial(\rho F)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho F V)}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\pi I}{F} \quad (20)$$

$$\rho c_l F \frac{dT_l}{dt} = \int_{\Pi} \alpha(T, V, x) (T_a - T_l) dS \quad (21)$$

Ключевой особенностью модели является расчет переменного коэффициента теплоотдачи α . Он не принимается константой, а вычисляется в зависимости от физического процесса.

Практическая значимость модели состоит в возможности ее использования для выбора рациональных режимов закалки материала и управления процессом охлаждения с целью повышения износостойкости рабочих органов глубоководных аппаратов.

Список использованной литературы

1. Применение импульсной закалки для упрочнения сменных деталей глубокорыхлителей / Г. И. Анискович, В. Г. Мисько, М. А. Шевчук, М. М. Шукан // Аграрная наука и инновационное развитие АПК: состояние, проблемы и перспективы : сборник материалов международной научной конференции, Смоленск, 18 апреля 2024 года. – Смоленск: Смоленская государственная сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 163–168.
2. Анискович, Г. И. Применение импульсной закалки для упрочнения сменных деталей глубокорыхлителей / Г. И. Анискович, М. А. Шевчук // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 16-17 октября 2024 г. : в 2 ч. - Минск : БГАТУ, 2024. – Ч. 2. – С. 40–42.
3. Макаров, С. С. Математическая модель охлаждения цилиндрической заготовки одномерным нестационарным потоком воды / С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, Е. В. Макарова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 4 (207). – С. 195–201.
4. Макаров С.С., Чекмышев К.Э., Храмов С.Н., Макарова Е.В. Математическое моделирование охлаждения при закалке осесимметричных металлических заготовок // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Ижевск: Из-во ИжГТУ, 2014. №3 (63). С. 38–43.
5. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов : учебник для вузов / И. И. Новиков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 480 с.
6. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справ. изд. / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.

УДК 621.316

А.И. Зеленькевич, канд. техн. наук, доцент,

В.М. Збродыга, канд. техн. наук, доцент,

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск*

Н.Е. Шевчик, канд. техн. наук,

*РНПУП «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»,
г. Минск*

Е.А. Дерюгина, канд. техн. наук, доцент,

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ» ПРИ ПИТАНИИ РЕЗКО ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Ключевые слова: трансформатор, схема соединения «звезда-двойной зигзаг», термическое моделирование, нестационарные тепловые процес-