УДК 536.24

Панин В.В., Кривошей Ф.А., Семин А.А., Макаров А.М.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЯ В ПРИБЛИЖЕНИИ «БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ» ТЕМПЕРАТУРЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ

В приближении «бегущей волны» определены предельные значения температуры, при которой происходят термические повреждения (микротрещины – «паутина») теплообменных поверхностей двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: *температура, «бегущая волна», термическое повреждение.*

Постановка проблемы. Определение температуры огневой поверхности поршня при аварийном нагружении двигателя и выбор метода решения этой проблемы.

Анализ последних исследований и публикаций. Впервые термин «бегущая волна» был определен академиком Белорусской Академии наук Лыковым А.В. и получил дальнейшее развитие в работе д.т.н. Кривошея Ф.О. «Обобщение решения параболических уравнений типа бегущей волны на случай переменной скорости» [3] и в настоящей работе.

Цель исследования. Предупреждение термического повреждения теплообменных поверхностей двигателей внутреннего сгорания.

Изложение материала. При аварийном нагружении двигателя из «холодного состояния» (328. . . 333 *К*) резко возрастает напряженность его деталей. Поскольку термические повреждения, в частности, днища поршня за времена порядка 10. . .15 *мин* проникают на глубину 3. . .5*мм*, то допустимо рассматривать его как полуграничное тело вдоль оси цилиндра. Численная оценка такого допущения показала, что его относительная погрешность по температурам составляет 2. . .3%.

Известно, что в строгой постановке задача нестационарного конвективного теплообмена должна формулироваться и решаться как сопряженная задача с граничными условиями (ГУ) IV рода [1]. Такая постановка предполагает решение внешней гидродинамической задачи и сопряжение ее результатов с решением внутренней задач теплопроводности. Однако сложность быстропротекающих нестационарных гидродинамических процессов в цилиндре делает как формулировку, так и решение задачи в такой постановке практически не возможными. Поэтому в практике исследований теплонапряженности двигателей для оценки интенсивности теплообмена широко (но вынужденно) используют ГУ III рода

$$q = \alpha_r (t)\ [T_r (t) - T_{cm} (t)], \qquad (1)$$

где q – плотность теплового потока на границе, *Вт/м*^{2}; $\alpha_г$ – коэффициент теплоотдачи от газов к тепловоспринимающей поверхности, *Вт/м*^{2}*К*; $T_г$ – температура газа, *К*; $T_{ст}$ – температура стенки, *К*; t – время, *с*. Наибольшая теплонапряженность деталей двигателя наблюдается в аварийном режиме, поэтому для определения $\alpha_г$ используется наиболее распространенная полуэмпирическая формула Эйхельберга

$$a_r = \sqrt{p_r T_r} \cdot \sqrt[3]{c_m} \cdot \sqrt[4]{p_k}, \qquad (2)$$

где $p_r T_r$- соответственно давление *(МПа)* и температура *(К)* рабочего тела (газа); p_k- давление надувочного воздуха, *(МПа);* c_m- средняя скорость поршня, *(м/с).*

Известен класс решений параболических уравнений, имеющих вид «бегущей волны», распространяющийся с постоянной скоростью *V*. Решением такого вида описывается, например, прогрев вещества, по которому с постоянной скоростью V распространяется детонационная волна, на фронте которой реакция поддерживает постоянную температуру [2]. Аналогично можно полагать, что температурное поле может быть описано уравнением типа «бегущей волны», имеющим решение в виде $T = T(x - V\,t)$, где x – координата. Решение такого вида можно получить, используя понятия скорости распространения изотермической поверхности [1]. Решение уравнения для полного дифференциала изотермы

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \qquad (3)$$

в случае V=*const* имеет вид $T = T\,(x - V\,t)$, где $V = dx/dt$ – скорость распространения изотермической поверхности. Решение с аргументом $(x - V\,t)$ пригодны лишь для специальных случаев, например, [2]. Очевидно, что в общем случае скорость распространения возмущения переменна [3]. Аргумент искомого решения можно получить из решения смешанной задачи для управления (3), он имеет вид:

$$\xi = x = \int_0^t V(x, t')\,dt' \qquad (4)$$

Относительное изменение теплофизических свойств теплопроводимости (λ) и удельной теплоемкости $(c\rho)$ в рассматриваемом диапазоне температур 333. . 700К составляет 15. . 20%, что приводит к относительной погрешности решения прямой задачи теплопроводимости порядка 4. . .6%. Для оценки температуры повреждения можно использовать постоянные средне интегральные значения λ и $c\rho$. Поэтому можно использовать линейное уравнение теплопроводимости:

$$\frac{d}{dt} - a\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \qquad (5)$$

где a – температуропроводимость. Будем искать решение уравнения (5) в виде $T = T(\xi)$. Подставляя эту функцию в уравнение (5), после преобразование получим уравнение:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + \left(\frac{V}{a} - \int_0^t \frac{d^2V}{dx^2}\,dt'\right)\left(1 - \int_0^t \frac{d^2V}{dx}\,dt'\right)^{-2}\frac{dT}{d\xi} \qquad (6)$$

общее решение, которого имеет вид:

$$T(\xi) = c_1 + c_2 exp[-(\frac{V}{a} - \int_0^t \frac{d^2V}{dx^2}\,dt')(1 - \int_0^t \frac{dV}{dx}\,dt')^{-2}\cdot\xi - 1] \qquad (7)$$

где постоянные c_1 и c_2 определяются из краевых условий.
Из выражения (7) следует:

$$-\left(1 - \frac{d\varphi}{dx}\right)^2 \ln\left(\frac{T - T_н}{T_{\xi=0} - T_н}\right)\xi^{-1} = \frac{1}{a}\frac{d\varphi}{dt} - \frac{d^2\varphi}{dx^2} \qquad (8)$$

где $\varphi = \int_0^t V\,dt'$ Скорость V найдем из условия $\xi = 0$, когда координата распространения возмущения φ совпадает с произвольно выбранным значением независимой переменной x. Тогда $x = \int_0^t V(x, t')dt'$ - уравнение распространения теплового возмущения, соответствующее фронту волны. При $\xi \to 0$ из (8) следует, что функция φ удовлетворяет уравнению

$$\frac{d\varphi}{dt} - a\frac{d^2\varphi}{dx^2} = 0 \qquad (9)$$

и краевым условиям: $x \to 0$, $\varphi \to \varphi_0$; $x \to \infty$, $\varphi = 0$; $t \to 0$, $\varphi \to 0$. Решение задачи для φ в изображениях Лапласа имеет вид:

$$\varphi(x,s)=\varphi_0(s)\exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a}}\right) \qquad (10)$$

где s – параметр преобразования Лапласа. Продифференцируем выражение (10) по x и умножим обе части полученного равенства на s $^{-3/2}$, тогда после преобразования получим:

$$\sqrt{a}L^{-1}\left[\frac{\varphi}{\varphi_0}\cdot\frac{s}{s\sqrt{s}}\right]=2\sqrt{\frac{at}{\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right)-x\cdot erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \qquad (11)$$

где L^{-1}, $erfc = 1 - erf$ – соответственно оператор обратного преобразования Лапласа и функция ошибок Гаусса. Из выражения (11) следует, что в его левой части при $x \to 0$ числитель $\varphi \to \varphi_0$, знаменатель $\varphi_0 s\sqrt{s} \to 1$, откуда $\sqrt{a\varphi_0} \to s^{3/2}$, и $\varphi_0 = 2\sqrt{\frac{at}{\pi}}$, что тождественно правой части этого выражения при $x=0$.

Следовательно:

$$\varphi(x,t)=2\sqrt{\frac{at}{\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right)-x\cdot erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \qquad (12)$$

откуда получаем выражение для скорости распространение изотермы

$$V=\sqrt{a}\cdot\sqrt{\frac{1}{\pi t}}\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \qquad (13)$$

Таким образом, скорость V представляет произведение $\sqrt{a}$ на функцию источника в теории теплопроводности. Решение уравнения (5), выражение через скорость, в интегральной форме имеет вид:

$$\int_0^t \frac{T(t')dt'}{\sqrt{\pi(t-t')}}=\sqrt{\frac{1}{a}}\int_0^t T_0(t-t')V(t')dt' \qquad (14)$$

где $T_0 = T(0,t)$ – температура на границе $x = 0$.

При $T_0 = const$ из (14) получим выражение $T=T_0\left(1-erf\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$, тождественное решению, произведенному в [1]. Изображение по Лапласу решения (14) имеет вид:

$$T(x,t)=T_0(s)e^{-x\sqrt{\frac{s}{a}}}$$

оригинал, которого

$$T(x,t)=\frac{x}{2\sqrt{a\pi}}\int_0^t T_0(t-t')\frac{e^{-\left(\frac{x^2}{4at'}\right)}}{(t')^{3/2}}dt' \qquad (15)$$

После преобразования (15) получаем выражение:

$$q(t)=\frac{\lambda}{\sqrt{a\pi}}\int_0^t \frac{dT_0(t')}{dt'}\cdot\frac{dt'}{\sqrt{(t-t')}} \qquad (16)$$

идентично приведенному в [4]. Подставляя в (16) ГУ III рода (1), получаем уравнение для искомой температуры $(T_{cm} = T_0)$ на поверхности теплообмена

$$a[T_r - T_0(t)]=\frac{\lambda}{\sqrt{a\pi}}\int_0^t \frac{dT_0(t')}{dt'}\cdot\frac{dt'}{\sqrt{(t-t')}} \qquad (17)$$

Решение уравнения в изображениях Лапласа таково:

$$T_0(s)=\frac{T_\varphi}{s(\varphi+\sqrt{s})}+\frac{T_н}{\sqrt{s}(\varphi+\sqrt{s}}$$

Оригинал имеет вид:

$$T_0(t) = T_г + (T_н - T_г)[e^{\varphi^{2t}}(1 - erf\,\varphi\sqrt{t}] \quad (18)$$

где $\varphi = a\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda}}$, λ – коэффициент теплопроводимости, *Вт/мК*, t – текущее время, *с*. По данным в [5] для двигателя *Sulzer RD76* $a = 210$ *Вт/м²К*, $\lambda = 35$ *Вт/мК*, $a = 9 \cdot 10^{-6}$ *м²/с*, средняя за цикл температура газов $T_г = 1173$ *К*, начальная температура перед аварийным нагружением $T_н = 333$ *К*.

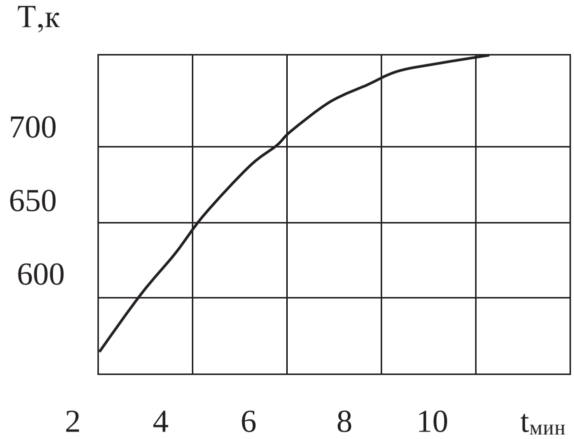

Рис. 1. **Изменение температуры поверхности теплообмена во время аварийного нагружения двигателя Sulzer RD76**

На рис. 1 показано изменение температуры поверхности теплообмена во время аварийного нагружения двигателя, описанного в [5].

Выводы. При t = 1200 . . .1800 с температура днища поршня достигает предельного для данного металла значения 750 К, что повышает риск его термического повреждения. При форс-мажорных обстоятельствах (аварийном нагружении двигателя или его перегрузках при плавании во льдах) необходимо использовать съемные днища поршней из жаропрочной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности . – Москва: Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. Зельдович Я. Б., Рейзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – Москва: Наука, 1966. – 686 с.
3. Кривошей Ф. А. Обобщение решения параболических уравнений типа бегущей волны на случай переменной скорости // Докл. АН Украины. – 1992. - №5. – С. 82-843.
4. Ландау Л. Д., Лившиц В.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – Москва: Наука. – 1988. – 736 с.
5. Овсянников М. К., Давыдов Г. А. Тепловая напряженность судовых дизелей. – Ленинград: Судостроение, – 1975. – 260 с.

Панін В.В., Кривошей Ф.О., Сьомін О.А., Макаров О.М.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМІЧНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ТЕПЛОНАПРУЖЕННИХ ПОВЕРХОНЬ ДВИГУНА В НАБЛИЖЕННІ «БІГУЧОЇ ХВИЛІ» ТЕМПЕРАТУРИ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ

В наближенні «бігучої хвилі» визначені граничні значення температури, яка призводить до термічного пошкодження (мікротріщини – «павутина») поверхонь теплообміну двигуна внутрішнього згоряння.

Ключові слова: *температура, «бігуча хвиля», термічне ураження.*

Panin V., Krivoshey F., Syomin O., Makarov O.
DEFINING OF THE TEMPERATURE OF THERMAL DAMAGE OF THE HEAT-STRESSED SURFACES OF THE ENGINE IN THE APPROXIMATION OF «RUNNING WAVE» WITH VARIDLE VELOCITY

In the approximation of «running wave» temperature limits were defined, which cause thermal damage (microcracks – «web» of the heat transfer surfaces of the internal combustion engine.

Keywords: *temperature, «running wave», thermal damage.*

УДК 539.3

Левченко В.В., Безверхий А.И., Макиевский А.И.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ С АЗИМУТАЛЬНЫМИ РАЗРЕЗАМИ ЭЛЕКТРОДОВ

Получено общее решение задачи об электромеханических колебаниях пьезокерамической кольцевой пластины. Для пластин с радиальными разрезами электродного покрытия при различных условиях закрепления (свободный край - свободный край, свободный край - жестко защемленный край) численно определены и проанализированы спектры собственных частот колебаний и зависимость форм колебаний от количества и геометрии разрезов.

Ключевые слова: *Пьезокерамическая кольцевая пластина, радиальные разрезы покрытия электродов, неосесимметричные электромеханические колебания, спектры собственных частот.*

Анализ современного состояния проблемы. Круговые тонкие пьезокерамические диски со сплошными и разрезаными електродами используются, как элементы ультразвуковых электромеханических преобразователей для излучения и прийома акустических колебаний, а также в резонаторах и фильтрах частот [4,6,7]. Концентрические электроды у виде разделенных кольцевыми разрезами или неполного електродного покрития дают воможность выделять вибранные обертоны и гасить нежелательные колебания [4,7]. Возможны множественные варианты как електрического соединения концентрических електродов, так и размещения неполного електродного покрития. В пьезоэлектрических вибраторах круглой конфигурации (диски и кольца) собственные формы осесимметричных колебаний, начиная со второй собственной частоты (на обертонах) имеют узловые концентрические круги [2,4,7]. Вследствие возникновения зон растяжения и сжатия снижается эффективность электромеханической связи. Во избежание такого недостатка предложено [4,7,8] разрезать электродное покрытие по узловым концентрических кругах. Опубликованные теоретические исследования в этом направлении не дают достаточной информации анализа этого явления, что и повлекло изложенные в данной статье исследования .

Постановка и общее решение задачи. Планарные гармонические колебания пьезоэлектрической круглой пластины с электродироваными лицевыми плоскостями