

2. Оцінка рівня шкідливих речовин у ВГ автомобілів за методом розрахунку витрат палива фактично вимірюваної інтенсивності руху може бути використане при прийнятті рішень щодо переустрою екологічно небезпечних перехресть міста.

#### Перелік посилань

1. Луканин В. Н. Промышленно-транспортная экология / Луканин В. Н., Трофименко Ю.В. ; [под ред. В. Н. Луканина]. – М. : Высш. шк., 2001. – 273 с.
2. Завьялов С. В. Транспорт и контроль за выбросами отравляющих веществ в атмосферу / Завьялов С. В. – М. : Транспорт, 2001. – 114 с.

Одержано 10.10.2009

© Д-р техн. наук Г. Ф. Бабушкін, канд. техн. наук О. Ф. Кузькін,  
канд. техн. наук В. П. Юдін, О. О. Падченко  
Національний технічний університет, м. Запоріжжя

G. F. Babushkin, O. F. Kuzkin, V. P. Judin, E. A. Padchenko

TRANSPORT-ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF ZAPORIZHNYE

---

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СИЛОВЫХ УДАРАХ

Исследован адиабатический нестационарный процесс изменения температуры тонкого поверхностного слоя деформируемого твердого тела при многократном повторении ударов частицами малой массы конечной геометрии.

Этот процесс наблюдается при упрочнении рабочих поверхностей материала металлическими шариками малого радиуса в ультразвуковых установках [1]. При этом исследуется только конечный результат упрочнения, что на наш взгляд не является полным исследованием, т.к. процесс передачи энергии не рассматривается.

Энергия, расходуемая при ударе (кинетическая энергия ударяющей частицы) не может исчезнуть, а в соответствии с общим законом сохранения энергии, принимает новую форму, претерпевая изменение. Часть энергии ударяемой частицы производит работу остаточной деформации, а оставшаяся часть энергии претерпевает определенное превращение из одного вида в другой. Поскольку, сопротивляющиеся внешней силе внутренние силы можно рассматривать как силы трения, естественно ожидать, что эта часть энергии примет тепловую форму, поскольку как в статическом, так и в динамическом опыте можно наблюдать нагревание тела [2].

Исследуя процесс превращения энергии при многократном повторении ударов твердыми частицами малой массы конечной геометрии по поверхности деформируемого твердого тела, можем получить следующее дифференциальное уравнение (условные обозначения приведены в приложении):

$$\rho \delta \frac{d C_p (T - T_0)}{d t} + \frac{G}{V_1} C_p (T - T_0) = \rho_1 V_1^3 \frac{V_1 t}{r} \quad (1)$$

с однородными начальными условиями: при  $t = 0$ ,  $C_p (T - T_0) = 0$ . В левой части уравнения (1) представлена сумма энергий затраченной на нагревание поверхностного слоя деформируемого тела и поглощенной деформиру-

емым телом. В правой части указана энергия ударяющей частицы умноженной на число ударов  $\frac{V_1 t}{r}$ , (числом Струхаля). Энергию, затраченную на деформацию поверхности тела [3], в этой работе мы не учитываем, поскольку она является незначительной в сравнении с остальными энергетическими затратами. Заменяя выражения в уравнении

(1) переменными  $y$ ,  $\tau$  и коэффициентом  $A$ ,  $y = \frac{C_p(T-T_0)}{V_1^2}$ ;  $\tau = \frac{V_s}{V_1} \cdot \frac{V_s}{\delta} t$ ;  $A = \frac{\rho_1 \cdot V_1^2}{\rho \cdot V_s^2} \cdot \frac{V_1^2}{V_s^2} \cdot \frac{\delta}{r}$ , получим неоднородное линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{dy}{d\tau} + y = A \cdot \tau \quad (2)$$

с начальным условием  $y(0) = 0$ , решение которого можно записать в виде

$$y = A(\tau - (1 - e^{-\tau})). \quad (3)$$

Поскольку скорость продольных волн  $V_s$  в металлах достаточно высока, то параметр  $\tau$  к концу первой секунды достигает значительной величины (порядка  $10^9$ ), что позволяет в уравнении (3) пренебречь выражением  $(1 - e^{-\tau})$ . Тогда выражение (3) упрощается к виду

$$y = A \cdot \tau.$$

Откуда следует соотношение, связывающее искомую температуру с временем внешнего силового воздействия

$$T = \frac{\rho_1 \cdot V_1^2}{\rho \cdot V_s^2} \cdot \frac{V_1}{r} \cdot t \cdot \frac{V^2}{C} + T_0. \quad (4)$$

Соотношение (4) указывает на прямую зависимость температуры поверхности тела от скорости ударяющих частиц и плотности их материала, времени силового воздействия и обратную зависимость от скорости поглощения энергии рабочим телом.

На рис.1 представлен график зависимости изменения прироста температуры поверхности твердого тела при многократном повторении ударов.

Представляется интересным заметить, что если построить кривую изменения температуры в безразмерной форме в координатах  $x = \frac{\rho_1 \cdot V_1^2}{\rho \cdot V_s^2} \cdot \frac{V_1}{r} \cdot t$  и  $y = \frac{C_p(T-T_0)}{V_1^2}$ , то получим прямую линию, представленную на рис. 2.

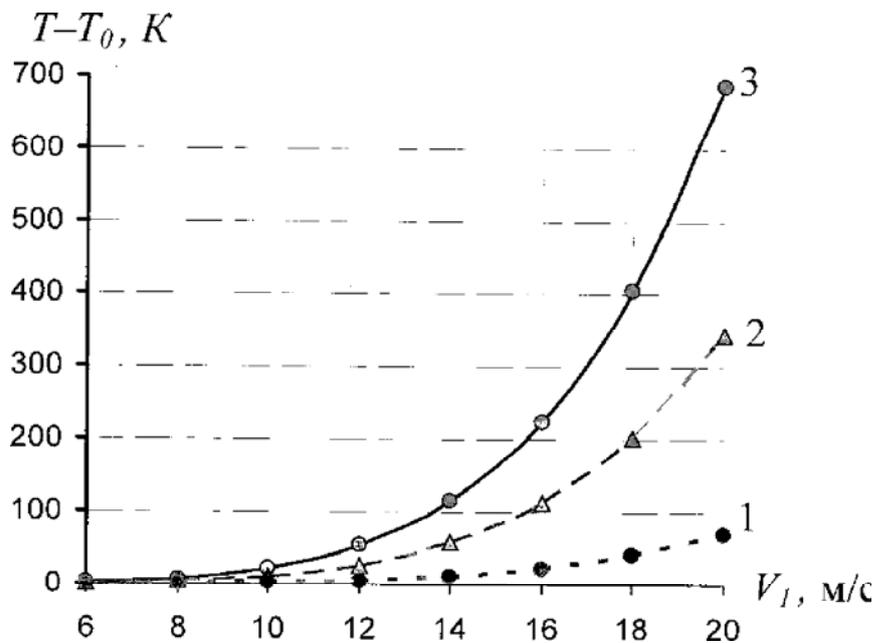


Рис. 1. Зависимость изменения прироста температуры поверхности твердого тела от скорости ударяющей частицы от времени силового воздействия: 1 – 60 с, 2 – 300 с, 3 – 600 с

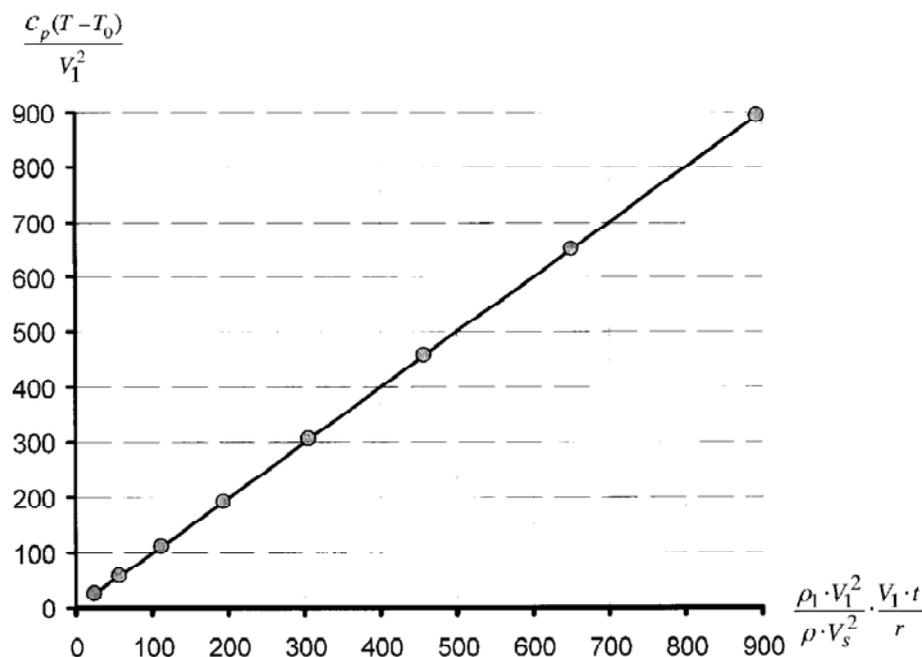


Рис. 2. Зависимость  $\frac{c_p(T-T_0)}{V_1^2}$  (ось ординат) от  $\frac{\rho_1 \cdot V_1^2 \cdot V_1 \cdot t}{\rho \cdot V_s^2 \cdot r}$  (ось абсцисс)

В качестве иллюстрации определения температуры поверхности рабочего тела, приведем пример при следующих условиях: рабочее тело – титановая пластина, для ударного воздействия использованы стальные шарики с  $r = 10^{-3}$  м,  $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$  м,  $t = 300$  с,  $V_1 = 14$  м/с. Прирост температуры поверхности рабочего тела составит примерно  $57,7^\circ$ .

#### Приложение

$\rho$  – плотность материала лопатки, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_1$  – плотность материала ударяющих частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – толщина поверхностного слоя деформируемого твердого тела, м;  $t$  – продолжительность времени силового воздействия, с;  $G$  – модуль сдвига деформируемого твердого тела, кг/м·с<sup>2</sup>;  $T$  – температура деформируемого твердого тела, град., К;  $T_0$  – начальная температура деформируемого твердого тела, град., К;  $c_p$  – теплоемкость деформируемого твердого тела, Дж/кг·К;  $V_1$  – скорость ударяющей частицы, м/с;  $V_s$  – скорость распространения продольных волн в материале, м/с;  $r$  – приведенный радиус частицы, м.

#### Перечень ссылок

1. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [ Богуслаев В. А., Яценко В. К. и др.] – Запорожье, изд-во ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
2. Давиденков Н. Н. Избранные труды : в 2-х т. / Н. Н. Давиденков. – К. : Наукова думка, 1981. – Т. 1. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – 704 с.
3. Асатурян А. Ш. Об ультразвуковом упрочнении металлических материалов / Асатурян А. Ш., Мязин А. А., Пухальская Г. В. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009 – № 2 – С. 46–49.

Одержано 26.01.2010

© Д-р техн. наук А. Ш. Асатурян, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий, А. А. Мязин  
Национальный технический университет, г. Запорожье

A. S. Asaturyan, V. E. Olshanetskiy, A. A. Myasin

**MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE FIELD FOR POWER STROKES**