

## ТЕОРИЯ ИЗНОСОУСТОЙЧИВОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

**Приймаков А.Г.**, к.т.н., профессор; **Градыский Ю.А.**, к.т.н., доцент

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко,  
г. Харьков, Украина*

Целью данной работы является разработка методологии определения параметров усталостного изнашивания конструкционных материалов (однородных и композиционных), которые применяются в сельскохозяйственном машиностроении в перманентном режиме.

В результате многих исследований [1-3] выявлено явление разрушения материала, которое характеризуется скрытым (латентным) периодом развития. При многократном влиянии острых абразивных частиц материал изнашивается в результате микрорезания и накопления повреждений полидеформационного характера в микрообъемах, которые прилегают к кратеру (след частицы). При контактировании частичек округлой формы низкой плотности и кинетической энергии единичные акты не вызывают непосредственного износа массы материала, но сопровождаются накоплением повреждений в зоне удара в результате циклической нагрузки микрообъемов поверхностного пласта.

Таким образом, накопление повреждений в материале, как в случае микрорезания, так и при его отсутствии, всегда имеет место и должно учитываться при определении (установлении) ресурса машиностроительных конструкций.

Рассмотрим усталостное разрушение материала, которое характеризуется скрытым периодом накопления повреждений [1, 4] и отвечает условиям соударения, при которых параметр выносливости  $\sigma_r \neq \text{const}$ .

В случае использования модели гомогенного анизотропного материала его акустические и механические характеристики могут быть найдены по широко используемому при построении моделей КМ правилу смесей.

В этом случае можно записать:

$$\begin{cases} \rho_M = \rho_C f_C + \rho_B f_B; \\ C_M = C_C f_C + C_B f_B; \\ E_M = E_C f_C + E_B f_B; \\ \mu_M = \mu_C f_C + \mu_B f_B, \end{cases} \quad (1)$$

где  $f_C, f_B$  – соответственно объемное содержание связующего и волокна в конструкционном материале (однородном и композиционном);  $\rho_M, C_M, E_M, \mu_M$  – плотность, скорость распространения звука, модуль упругости и коэффициент Пуассона в этом материале.

В работе [2], на основе анализа многочисленных экспериментов сотрудников лаборатории авиационных материалов ВПС США установлено, что практически усталостному изнашиванию предшествует инкубационный период, в конце которого величина перманентного разрушения линейно зависит от времени или числа ударов частиц на единицу площади поверхности (рисунок 1) в процессе эксплуатации.

Выражение для перманентного разрушения от многократного влияния частиц эквивалентно весовому износу материала на единицу площади поверхности, имеет вид:

$$W_y = \xi(n - n_{\text{инк}}), \quad (2)$$

где  $\xi$  – параметр, который зависит от  $n_{инк}$  и определяет наклон прямой  $W_y = f(n)$ ;  $n_{инк}$  – накопленное число ударов частиц на единицу площади поверхности, которая отвечает окончанию инкубационного периода.

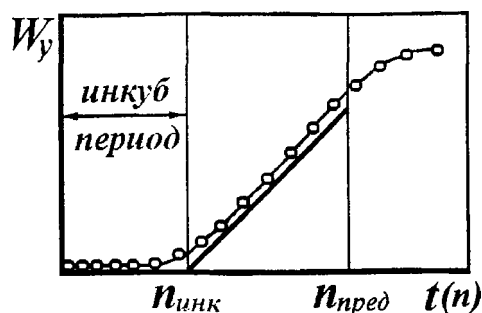


Рисунок 1 – Зависимость усталостного изнашивания от числа ударов:  
○ – эксперимент; — – модель

Как уже отмечалось [1-4], во многих машинах и механизмах процесс износа поверхностей происходит в условиях колебаний, особенно это касается сельхозмашин.

В [3, 4] получена формула для износа поверхностей, из которой следует, что для величины износа спокойной поверхности справедлива зависимость:

$$W_o = n_o S t \gamma m, \frac{V_o^2 \sin^2 \alpha \left( \frac{\delta_p}{\delta} \right)^2}{\sigma_p}. \quad (3)$$

В общем случае наличие гармоничных колебаний под углом  $\beta$  к поверхности с частотой  $\omega$  и амплитудой  $A$  (рисунок 2) приводит к сменной во времени скорости движения частиц относительно поверхности  $V$ , угла падения частиц  $\alpha$  и частоты падения частиц  $n$ .

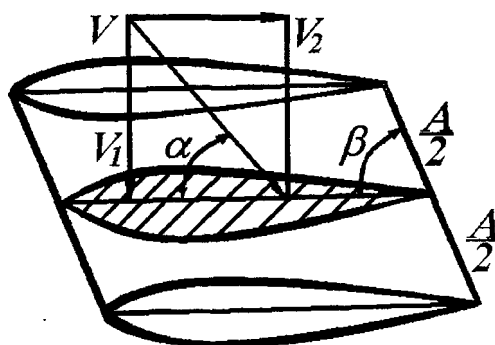


Рисунок 2 – Схема колебаний поверхности материала в общем случае

Колебание поверхности характеризуется мгновенной линейной скоростью колебаний  $V_K$ , равной

$$V_K = \frac{A \omega}{2 \pi} \cos \frac{\omega t}{2 \pi}. \quad (4)$$

Так как число частиц в единице объема не зависит от частоты и амплитуды колебаний, то

$$\frac{n}{V_1} = \frac{n_o}{V_o \sin \alpha_o}. \quad (5)$$

Здесь и дальше индексом «0» обозначены параметры перманентного разрушения при отсутствии колебаний (спокойная поверхность).

Составные скорости частиц в условиях колебаний равны:

$$\begin{aligned} V_1 &= (V_0 \sin \alpha_0 + V_K \sin \beta) = V \sin \alpha, \\ V_2 &= (V_0 \cos \alpha_0 + V_K \cos \beta) = V \cos \alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Мгновенная скорость перманентного разрушения за один период колебаний равна:

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} = \frac{S \gamma m n V^2 \sin^2 \alpha \left( \frac{\delta_P}{\delta} \right)^2}{\sigma}. \quad (7)$$

С учетом (4), (5) и (6) выражение (7) при  $\frac{\delta_P}{\delta} = \text{const}$  принимает вид:

$$\bar{W} = \frac{S \gamma m n_0}{\sigma V_0 \sin \alpha_0} \left( \frac{\delta_P}{\delta} \right)^2 \int_0^T \left( V_0 \sin \alpha_0 + \frac{A \omega}{2 \pi} \cos \frac{\omega t}{2 \pi} \sin \beta \right)^2 dt. \quad (8)$$

Учитывая, что  $\sin K \frac{\omega t}{2 \pi} \Big|_0^T = 0$ , где  $K = 1, 2, 3, \dots$ , после интегрирования получим:

$$\bar{W} = \frac{S \gamma m}{\sigma} n_0 V_0^2 \sin^2 \alpha_0 \left( \frac{\delta_P}{\delta} \right)^2 \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{A \omega}{2 \pi} \right)^2 \frac{\sin^2 \beta}{V_0^2 \sin^2 \alpha_0} \right] T. \quad (9)$$

Считая, что  $T \ll t$ , получим величину перманентного разрушения за  $\frac{t}{T}$  периодов колебаний:

$$W = \bar{W} \frac{t}{T} = W_0 \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{A \omega}{2 \pi} \right)^2 \frac{\sin^2 \beta}{V_0^2 \sin^2 \alpha_0} \right]. \quad (10)$$

Формула (9) и, соответственно, (10) справедливы при условии, что частички в любой момент времени на протяжении периода двигаются к поверхности, которая колеблется, достигают ее, т.е.

$$A \frac{\omega}{2 \pi} \sin \beta \leq V_0 \sin \alpha_0. \quad (11)$$

Максимальное значение перманентного разрушения имеет место при  $\beta = \frac{\pi}{2}$  и  $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$W_{\max}^* = W_0 \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{A \omega}{2 \pi} \right)^2 \frac{1}{V_0^2} \right]. \quad (12)$$

Если вместо условия (11) выполняется хотя бы в один момент времени условие

$$\frac{A \omega}{2 \pi} \sin \beta > V_0 \sin \alpha_0, \quad (13)$$

физическая суть которого означает, что в промежутках времени  $(t_1, t_2)$  частицы не достигают колеблющейся поверхности, то интегрирование выражения (8) с исключением участка  $(t_1, t_2)$  приводит к зависимости:

$$\begin{aligned}
W^{**} = W_o & \left\{ 1 + \frac{t_1 - t_2}{T} + 3 \frac{A \sin \beta}{T V_o \sin \alpha_o} \left( \sin \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) + \right. \\
& + \frac{3 A^2 \omega \sin^2 \beta}{2 \pi V_o^2 \sin^2 \alpha_o} \left[ \frac{\omega}{4\pi} \left( 1 + \frac{t_1 - t_2}{T} \right) + \frac{1}{T} \left( \sin \frac{\omega t_1}{\pi} - \sin \frac{\omega t_2}{\pi} \right) \right] + \\
& \left. + \frac{A^3 \omega^2 \sin^3 \beta}{4 \pi^2 V_o^3 \sin^3 \alpha_o T} \left[ \left( \sin \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) - \frac{1}{3} \left( \sin^3 \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin^3 \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \quad (14)$$

Максимальное перманентное разрушение имеет место при  $\beta = \frac{\pi}{2}$

$$\begin{aligned}
W_{\max} = W_o & \left\{ \left( 1 + \frac{t_1 - t_2}{T} \right) + \frac{3 A}{V_o \sin \alpha_o T} \left( \sin \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) + \right. \\
& + \frac{3 A^2 \omega}{2 \pi V_o^2 \sin^2 \alpha_o} \left[ \frac{\omega}{2\pi} \left( 1 + \frac{t_1 - t_2}{T} \right) + \frac{1}{T} \left( \sin \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) \right] + \\
& \left. + \frac{A^3 \omega^2}{4 \pi^2 V_o^3 \sin^3 \alpha_o T} \left[ \left( \sin \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) - \frac{1}{3} \left( \sin^3 \frac{\omega t_1}{2\pi} - \sin^3 \frac{\omega t_2}{2\pi} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \quad (15)$$

Границы отрезка времени  $t_1$  и  $t_2$  являются корнями решения

$$A \frac{\omega}{2\pi} \sin \beta \cos \frac{\omega t}{2\pi} = V_o \sin \alpha_o, \quad (16)$$

из множества которых

$$t_k = \pm \frac{2\pi}{\omega} \arccos \left( \frac{V_o \sin \alpha_o}{A \omega} \right) + k\pi, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

физическую суть имеют только те, которые отвечают неравенствам (рисунок 3).

$$\frac{T}{4} < t_1 < \frac{T}{2}; \quad \frac{T}{2} < t_2 < \frac{3}{4}T \quad (18)$$

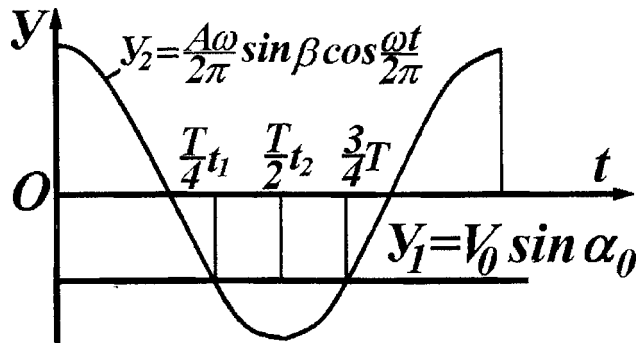


Рисунок 3 – К определению корней уравнения (16)

Перманентное разрушение, которое определяется выражением (15), меньше значения, которое определяется выражением (12), но больше, чем при отсутствии колебаний и в общем виде находится в диапазоне

$$W_{o \max} \leq W_{\max}^{**} \leq W_{\max}^* \left[ 1 + \frac{3}{V_o^2} \left( \frac{A \omega}{2\pi} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Если  $\frac{3}{V_0^2} \left( \frac{Aw}{2\pi} \right)^2 \ll 1$ , то колебание поверхности износа не приводит к изменению

перманентного разрушения по сравнению с эрозией недеформированной поверхности.

В ходе выполнения работы авторы сделали следующие выводы:

- перманентное абразивное изнашивание как однородных, так и композиционных конструкционных материалов, носит усталостный характер и ведет к потере выносливости элементов конструкции;
- колебательный процесс существенно влияет на усталостное изнашивание машиностроительных конструкций;
- создана и обоснована общая инженерная методика прогнозирования усталостного изнашивания в среднем машиностроении, в частности, в сельхозмашиностроении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цеснек, Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 263 с.
2. Циглер, Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. – М.: Мир, 1966. – 136 с.
3. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Експериментальне дослідження інтенсивності зношування та пов'язаного з ним напружено-деформованого стану визначальних пар тертя в середньому машинобудуванні. – Вестник науки и техники, 2005. – № 4 (21). – С. 19 – 28.
4. Приймаков, О.Г. Надійність і ресурс авіаційної наземної техніки. – Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2006. – Вып. 31.–С.62–70.

#### Аннотация

##### **Теория износоустойчивой выносливости и ее применение в сельскохозяйственном машиностроении**

В статье разработаны методологии определения параметров усталостного износа конструкционных материалов (однородных и композиционных) в перманентном режиме. В ходе выполнения работы сделан вывод, что колебательный процесс существенно влияет на усталостное изнашивание машиностроительных конструкций. Это необходимо учитывать при создании новых конструкций сельскохозяйственных машин.

#### Abstract

##### **Resistant to wear fatigue theory and its application in agricultural engineering**

In the article the methodologies of determination of parameters of tireless wear of construction materials (homogeneous and composition) are developed in the permanent mode. During implementation of work a conclusion is done, that a swaying process substantially affects the tireless wear of machine-building constructions. It is needed to take into account at creation of new constructions of agricultural machines.