

ТЕОРИЯ ИЗНОСОУСТОЙЧИВОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Приймаков А.Г., к.т.н., профессор; Градынский 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 многоразовом влиянии острых абразивных частиц материал изнашивается в результате микрорезания и накопления повреждений полидеформационного характера в микрообъемах, которые призывают 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 содержимое связующего и волокна в конструкционном материале (однородном и композиционном); ρ_M, C_M, E_M, μ_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 многоразового влияния частиц эквивалентно весовому износу материала на единицу площади поверхности, имеет вид:

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

где ζ – 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.

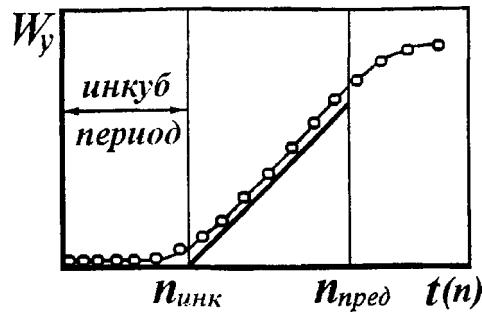


Рисунок 1 – Зависимость усталостного изнашивания от числа ударов:
○ – эксперимент; — модель

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:

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

В общем случае наличие гармонических колебаний под углом β к поверхности с частотой ω и амплитудой A (рисунок 2) приводит к сменной во времени скорости движения частиц относительно поверхности V , угла падения частиц α и частоты падения частиц n .

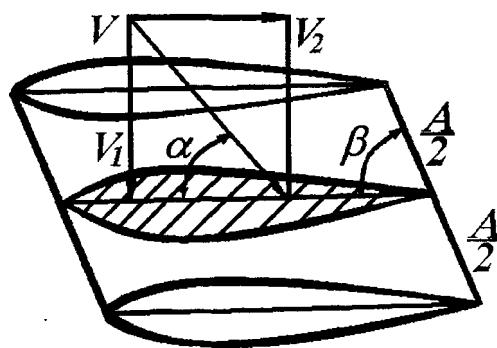


Рисунок 2 – Схема колебаний поверхности материала в общем случае

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:

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

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

$$\bar{W} = \frac{S \gamma m n_o}{\sigma V_o \sin \alpha_o} \left(\frac{\delta_P}{\delta} \right)^2 \int_0^T \left(V_o \sin \alpha_o + \frac{A \omega}{2 \pi} \cos \frac{\omega t}{2 \pi} \sin \beta \right)^3 dt. \quad (8)$$

Учитывая, что $\int_0^T \frac{\sin K \omega t}{2 \pi} dt = 0$, где $K = 1, 2, 3, \dots$, после интегрирования получим:

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

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

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

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.

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

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

$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$

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

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

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

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:

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

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

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

Границы отрезка времени t_1 и t_2 являются корнями решения

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

из множества которых

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

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

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

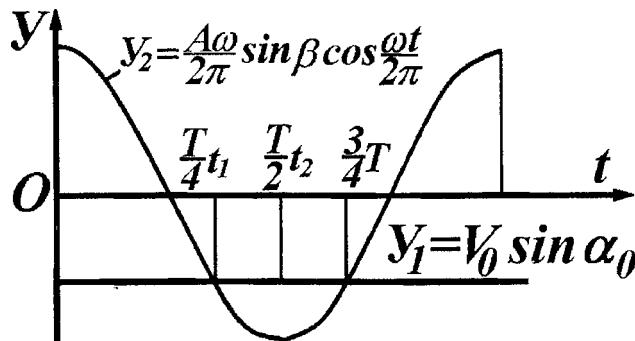


Рисунок 3 – К определению корней уравнения (16)

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

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

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 напруженно-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 износостойчивой 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.