



ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

8
2021

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499) 269-51-98

Адрес редакции

107076, Москва,

Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Телефон: 8-(495) 661-38-80.

E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru

www.mashin.ru

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, Алешин Н.П., д-р техн. наук, акад. РАН, Братухин А.Г., д-р техн. наук, Воронцов А.Л., д-р техн. наук, Гусейнов А.Г., д-р техн. наук, Дмитриев А.М., д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Драгунов Ю.Г., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Древаль А.Е., д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), Кутин А.А., д-р техн. наук, Омельченко И.Н., д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), Кузин В.В., д-р техн. наук, Попов Д.Н., д-р техн. наук, Попов А.В., д-р техн. наук, Рыбин В.В., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Трегубов Г.П., д-р техн. наук, Сычев А.П., канд. физ.-мат. наук, Скугаревская Н.В. (ответственный секретарь)

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за ПИ № 77-12421 в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Учредитель А.И. Савкин

Индекс 27841 ("Пресса России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер".

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансд солишнз"

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru

НАЗАД



[Контакты](#) [Оплата и доставка](#) [Личный кабинет](#)

[Поиск](#)

Для перехода на предыдущую страницу используйте эту кнопку

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИННОВАЦИОННОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ

8 (495) 785-60-69; 8 (916) 558-76-92
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2
realiz@mashin.ru

ВАША КОРЗИНА
Пуста



ИЗДАТЕЛЬСТВО



КАТАЛОГ



АВТОРАМ



РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ



КОНТАКТЫ

КНИГИ

ЖУРНАЛЫ
Прайс-лист

ВНИМАНИЕ!

Новый адрес редакций журналов Колодезный пер., 2 А.
ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

[Книги и журналы, просмотренные ранее](#)

[Вестник машиностроения](#)

Вестник машиностроения

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней



Подписные индексы по каталогу «Пресса России» 27841

ISSN: 0042-4633
Телефон: +7(495)661-38-80, +7(916)558-86-74 с 9:00 до 17:00
e-mail: vestmash@mashin.ru, vestmash@mail.ru

[добавить в корзину](#)
5200 руб.

[оформить подписку на журнал](#)

Разделы [Авторы](#)

- [Перелова](#)
- [Конструирование, расчет, испытания и надежность машин](#)
- [Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки](#)

1 2 3 4 5

[Текущий номер:](#) (2022 / 05)

[рус / eng](#)

НОМЕР: 2021 / 08

[Номер:](#) (2021 / 08)

[Редакционный совет](#)

Конструирование, расчет, испытания и надежность машин
[Аналитическое решение уравнений диффузии в многокомпонентных системах при нанесении диффузионных покрытий](#)
Мамедов А.Т. | Аббасов Э.О. | Ханкишиев И.А. | ariff-1947@mail.ru

[О журнале](#)

Расчет износа зубьев открытых зубчатых передач
Ишмуратов Х.К. | x.ishmuratov@mail.ru

[Требования к оформлению статей \(для авторов\)](#)

Авторы статьи
Ишмуратов Х.К.
x.ishmuratov@mail.ru

Расчет износа зубьев открытых зубчатых передач

УДК 621.891
DOI: 10.36652/0042-4633-2021-8-9-11

Исследуется абразивное изнашивание и, в частности, изнашивание зубчатых зацеплений в присутствии абразивных частиц. В условиях контактно-абразивного изнашивания при повышении твердости стали и содержания углерода объемы единичных повреждений поверхности, вызванных дроблением абразивных частиц, уменьшаются, при этом процесс качественно не изменяется. Прямое разрушение материала в процессе изнашивания продолжает оставаться определяющим.

Ключевые слова
зубчатое зацепление, изнашивание, адгезия, абразивные зерна, нагружение, сила трения

Уточнение теплового расчета редуктора учетом термической проводимости стыка
Иванов А.С. | Муркин С.В. | a-s-ivanov@yandex.ru

Архив

- [2022](#)
- [2021](#)
 - [01](#)
 - [02](#)
 - [03](#)
 - [04](#)
 - [05](#)
 - [06](#)
 - [07](#)
 - [08](#)
 - [09](#)
 - [10](#)
 - [11](#)
 - [12](#)
- [2020](#)
- [2019](#)
- [2018 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2017 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2016 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2015 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2014 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2013 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2012 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2011 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2010 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2009 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2008 Эл. версии бесплатно!](#)
- [2007 Эл. версии бесплатно!](#)

https://www.mashin.ru/eshop/journals/vestnik_mashinostroeniya/2029/23/

УДК 621.891

Ишмуратов Х. К., д-р техн. наук (Ташкентский ГТУ), e-mail: x.ishmuratov@mail.ru

Расчет износа зубьев открытых зубчатых передач

Трение в присутствии абразивных частиц характеризуется нестационарностью контактов твердых частиц с изнашиваемой поверхностью, высокими напряжениями и физико-химической активностью сопряженных поверхностей. При этом адгезия абразивных частиц минерального происхождения к металлической поверхности незначительна. Разрушение поверхности может происходить в результате однократного взаимодействия абразивной частицы в виде микрорезания с образованием стружки. Однако это маловероятно. Более вероятными являются процесс многократного деформирования поверхности абразивными частицами и процесс усталостного разрушения[1]. Разработка и анализ математической модели абразивного изнашивания применительно к зубчатым передачам выполнены Г. Я. Ямпольским и И. В. Крагельским, которые сделали предположение, что абразивная частица в виде сферы разрушается раньше, чем достигает глубины внедрения, необходимой для микрорезания. В условиях контактно-абразивного изнашивания при повышении твердости стали и содержания углерода объемы единичных повреждений поверхности, вызванные дроблением абразивных частиц, уменьшаются, однако сам процесс качественно не изменяется. Прямое разрушение материала продолжает оставаться определяющим в процессе изнашивания [2].

По мнению М. М. Тененбаума в формировании процесса изнашивания участвуют обе контактирующие поверхности, поэтому изменение твердости одной из них изменяет процессы изнашивания всего

сопряжения, если абразивные зерна имеют размер менее 1 мм [3]. Если изнашивание происходит при разрушении абразивных зерен, то больше изнашивается материал с меньшей твердостью и прочностью.

При частичном шаржировании абразивных зерен в более мягкий металл наблюдается повышенное изнашивание материала с большей твердостью [4].

Установленные связи между износостойкостью и другими показателями свойств материала, определяемыми стандартными методами, носят частный характер, их нельзя использовать при выборе износостойких материалов и назначении твердости для открытых зубчатых передач. Прогнозирование износа требует разработок более совершенных методик, основанных на четких физических представлениях о процессах абразивного изнашивания [5].

При работе зубчатых передач взаимодействия зубьев вдоль линии зацепления имеют переменный характер. Скорость относительного скольжения профилей зубьев изменяется от нуля (в полюсе зацепления) до максимального значения (момента контакта головки зуба и ножки сопряженного зуба зубчатых колес) [6].

Радиус кривизны эвольвенты в пределах рабочего профиля зуба меняется, что обуславливает изменение контактных напряжений.

Рассмотрим метод оценки износов зубьев.

В соответствии с законом абразивного изнашивания линейный износ h_0 профиля зуба за один цикл нагружения составит [7]:

$$h_0 = K_w \sigma_H L. \quad (1)$$

Здесь L – путь трения профиля зубьев, находящихся в контакте; σ_H – контактное напряжение по Герцу:

$$\sigma_H = \sqrt{w_n / (\pi \rho_{np})} / \lambda_E, \quad (2)$$

где ρ_{np} – приведенный радиус кривизны; $w_n = 10^3 K_H T_1 / (b_w r_1 \cos \alpha_w)$ – нормальная нагрузка, приходящаяся на единицу длины контакта ($r_1 = 0,5 m z_1$ – радиус делительной окружности шестерни); параметр λ_E определяется по формуле

$$\lambda_E = \sqrt{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2}, \quad (3)$$

здесь μ_1, μ_2 – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости E_1, E_2 - материалов шестерни и зубчатого колеса.

Путь трения L рассчитываем как произведение скорости v_c относительного скольжения сопряженных точек профилей на время их трения за одно зацепление [8]:

$$L = v_c t_{ц}. \quad (4)$$

Время процесса трения точки профиля за один цикл зацепления $t_{ц}$ зависит от ширины $2b_H$ контакта и тангенциальной составляющей v_t скорости перемещения:

$$t_{ц} = \frac{2b_H}{v_t}. \quad (5)$$

Ширину $2b_H$ контакта определяем по формуле

$$2b_H = 2,25 \lambda_E \sqrt{w_n \rho_{np}}. \quad (6)$$

Используя закон изнашивания с учетом выражений (1–6), запишем:

$$h_0 = K_w \frac{2,25 v_c}{\sqrt{\pi} v_t} w_n.$$

Введем обозначение коэффициента относительного скольжения $\eta = v_c / v_t$, получим:

$$h_0 = 1,269 K_w w_n \eta.$$

Таким образом, износ зубьев пропорционален нормальной нагрузке w_n и коэффициенту η относительного скольжения.

Износ зубьев зубчатого колеса за N_1 циклов нагружения будет соответствовать времени работы

$$h_1 = h_{01} 60 n_1 t_h = 76,14 K_{w1} w_n \eta_1 n_1 t_h.$$

Износ зубьев колеса за N_2 циклов будет соответствовать времени

работы

$$h_2 = h_{02} 60 n_1 t_h / u = 76,14 K_{w1} w_n \eta_1 n_1 t_h / u,$$

K_{w1} и K_{w2} – определяем экспериментально.

Выразив коэффициент относительного скольжения в функции радиусов ρ_1 и ρ_2 кривизны сопряженных зубьев зубчатых колес, получим систему уравнений [9]:

$$\begin{cases} h_1 = 76,14 K_{w1} w_n \left| \left(1 - \frac{\rho_{1n}}{\rho_1} \right) \right| n_1 t_h; \\ h_2 = 76,14 K_{w2} w_n \left| \left(1 - \frac{\rho_{2n}}{\rho_2} \right) \right| n_1 t_h / u, \end{cases}$$

где ρ_{1n} , ρ_{2n} – радиусы кривизны в полюсе.

Выражения $\eta_i = \rho_{ni} / \rho_i$ ($i = 1; 2$) берем по модулю, так как в полюсе зацепления скорость w_n скольжения изменяет направление, и при $\rho_i < \rho_{ni}$ данные выражения изменяют знак.

В соответствии с теорией зацепления зубчатых колес с эвольвентным профилем в полюсе зацепления отсутствует скольжение зубьев, а следовательно, и изнашивание. Этот вывод следует из выражения при $\rho_{ni} = \rho_i$. Некоторые исследователи считают, что вследствие искажения при износе эвольвент и в результате возникающего в полюсе проскальзывания, а так же ввиду пластических деформаций изнашивание имеет место и в полюсе зацепления [10].

При недостаточной твердости материала зубьев в полюсе зацеплений может возникнуть канавка на ведущем колесе, и образоваться гребень на ведомом зубчатом колесе. Это подтвердили эксперименты по исследованию формоизменений пластмассовых зубчатых колес.

Расчет износа зубчатых колес по данной методике требует знания коэффициента K_w изнашивания, который можно установить экспериментально путем модельных и стендовых испытаний относительно применяемого материала с учетом используемой конструкции привода и условий работы зубчатой пары.

Однако остаются открытыми вопросы о постоянстве данного

коэффициента при оценке формы изношенного профиля и его зависимости от шероховатости поверхности, структуры и состава абразива, кинематических и силовых факторов [11].

Для расчетов зубчатых колес предлагается использовать эксплуатационные данные аналогичных узлов. Однако без выявления всех факторов, влияющих на коэффициент изнашивания, данный подход может привести к существенным погрешностям.

Используя в качестве основного фактора показатель интенсивности изнашивания в виде отношения износа к пути трения, получена зависимость, позволяющая определить толщину изношенного слоя:

$$h_1 = 2,25 I_{hi} \sqrt{\frac{F_n \theta}{b_{w2} \rho_2 + \rho_1} \frac{v_c}{v_t} n_1 t_1}.$$

Для проверки справедливости расчетов их сопоставили с экспериментальными данными. При работе без смазочного материала зубчатых колес из стали 45 экспериментальная интенсивность изнашивания составила $I_{hэ} = 2,6 \cdot 10^{-7}$, а расчетами получили $I_{hрас} = 11 \cdot 10^{-7}$.

Относительный ресурс зубчатой пары определяет выражение

$$L_{hi} = \frac{[h_1] v_1}{I_n 2 b_n v_c n_1}.$$

При прочих равных условиях и заданном допустимом износе $[h_i]$ отношение ресурсов [12] составило:

$$\frac{L_{hэ}}{L_{hрас}} = \frac{I_{hрас}}{I_{hэ}} = \frac{11 \cdot 10^{-7}}{2,6 \cdot 10^{-7}} = 4,23.$$

Следовательно, прогнозируемый ресурс может отличаться от реального в 4 раза и более.

Таким образом, применяемый расчет изнашивания зубьев зубчатых колес учитывает только изнашивание от взаимодействия абразивных частиц и не учитывает частицы, находящиеся в клиновом зазоре. Не учитывается

также изнашивание в результате перекоса колец подшипников из-за прогиба вала, на который устанавливается зубчатое колесо. Следовательно, применяемая методика определения ресурса зубчатых колес нуждается в уточнении [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тихомиров П. В.** Теоретическое обоснование ресурса зубчатых передач лесохозяйственных машин по критерию износа: Дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2003. 136 с.

2. **Маликов А. А., Лихошерст В. В., Шалобаев Е. В.** Анализ и классификация процесса изнашивания зубчатых передач // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 9. С. 2–11.

3. **Тененбаум М. М.** Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин М.: Машиностроение, 1966. 331 с.

4. **Прохоров В. П., Тимофеев Г. А., Чернышова И. Н.** Эволюция эвольвентного зацепления при износе от истирания // Изв. вузов. Машиностроение. 2015. № 2 (959). С. 14–21.

5. **Беляев В. Е.** Повышение долговечности тракторных трансмиссий путём улучшения эксплуатационного режима смазки рабочих поверхностей ресурсопределяющих сопряжений: Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2000. С. 213.

6. **Ишмуратов Х. К.** Теоретическое обоснование ресурса зубчатых передач хлопкоуборочных машин по критерию износа: Дис. ... д-ра фил. по техн. наукам. Ташкент. 2019. 156 с.

7. **Дроздов Ю. Н.** Структура метода расчета на износ // Вестник машиностроения. 2003. № 1. С. 25–28.

8. **Дубовик Е. А.** Особенности изнашивания зубчатых передач трансмиссий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 3. С. 31–35.

9. **Икрамов У. А.** Расчетные методы оценки абразивного износа. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.

10. **Когаев В. П., Дроздов Ю. Н.** Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.

11. **Ишмуратов Х. К.** Накопление продуктов изнашивания при контакте выступов поверхностей зубчатых колес. // Вестник машиностроения. 2019. № 8. С. 40–44.

12. Старжинский В.Е., Солимтерман Ю.Л., Тескер Е.И., Гоман А.М., Осипенко С.А. Виды повреждений зубчатых колес: типология и рекомендации по предупреждению повреждений. Трение и износ, 2008, № 5, с. 465–482.

13. **Мышкин Н. К., Петроковец М. И.** Трение, смазка, износ. Физические основы и техническое приложение трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.