

УДК 620.178.3

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПЕРЕДАЧ ИЗ-ЗА ОТКАЗОВ, ВЫЗВАННЫХ ИЗНОСОМ, КОНТАКТНОЙ И ИЗГИБНОЙ УСТАЛОСТЬЮ

Краснов Ю.В., Никандров И.С., Горшков А.С.

Дзержинский политехнический институт Нижегородского государственного технического университета, Дзержинск, e-mail: ktmdpingtu@mail.ru

Исследовано влияние процесса изнашивания деталей на контактную усталостную прочность зубчатых передач. При моделировании работы зубчатой передачи использовали принцип роликовых аналогий. Экспериментальное исследование производилось при различных окружных скоростях, скоростях скольжения и напряжениях в контакте. Режимы испытаний соответствовали гидродинамическому и смешанному трению в контакте. Для закаленных образцов не было обнаружено корреляции между интенсивностью изнашивания и долговечностью образцов по критерию контактной усталостной прочности. Можно принять, что изнашивание при данных режимах не оказывает влияния на контактную усталостную прочность до тех пор, пока само не становится критерием отказа, кроме деталей с поверхностным упрочнением. При износе деталей с поверхностно упрочненным слоем значительно уменьшаются прочностные характеристики лежащих ниже слоев и увеличивается вероятность отслаивания упрочненного слоя. Предложено производить расчеты зубчатых передач с поверхностно упрочненными зубьями с учетом износа упрочненного слоя. Получены зависимости для оценки вероятности безотказной работы при действии как отдельных факторов, например контактных напряжений, с учетом изнашивания зубьев, так и вероятности безотказной работы зубчатой передачи в целом.

Ключевые слова: интенсивность изнашивания, контактная прочность, контактные напряжения, вероятность безотказной работы

ASSESSMENT OF PROBABILITY OF NON-FAILURE OPERATION OF TRANSFERS BECAUSE OF THE REFUSALS CAUSED BY WEAR, CONTACT AND FLEXURAL WEARINESS

Krasnov Yu.V., Nikandrov I.S., Gorshkov A.S.

*Dzerzhinsk Polytechnical Institute of Nizhny Novgorod State Technical University,
Dzerzhinsk, e-mail: ktmdpingtu@mail.ru*

The influence of the wear process of parts on the contact fatigue strength of gears is investigated. The principle of roller analogies was used to simulate the operation of the gear train. The experimental investigation was carried out at various circumferential speeds, slip velocities and stresses in contact. The test modes corresponded to hydrodynamic and mixed friction in contact. For quenched samples, no correlation was found between the wear rate and the durability of the samples by the criterion of contact fatigue strength. It can be assumed that wear under these conditions does not have a significant effect on contact fatigue strength until it itself becomes a failure criterion, except for surface hardening parts. When wear parts with a surface-hardened layer, the strength characteristics of the underlying layers decrease, and the probability of flaking of the strengthened layer increases. It is proposed to perform calculations of gears with surface hardened teeth taking into account the wear of the hardened layer. Dependences have been obtained for estimating the probability of failure-free operation under the action of individual factors, for example, contact stresses, taking into account the wear of the teeth, and the probability of failure-free operation of the gear train as a whole.

Keywords: intensity of wear process, contact strength, contact pressure, probability of failure-free operation

В настоящее время зубчатые передачи рассчитываются по критериям усталостной контактной и изгибной прочности. Однако при работе в реальных условиях зубчатые колеса подвержены износу [1], который как сам может являться критерием отказа, так и влиять на контактную и изгибную прочность. Поэтому актуальной является разработка методов расчета зубчатых передач с учетом процесса изнашивания.

Цель исследования – определение влияния износа на контактную прочность в процессе моделирования работы зубчатых передач; получение зависимостей для оценки вероятности безотказ-

ной работы при совместном действии различных факторов, вызывающих повреждение деталей.

Экспериментальное исследование влияния интенсивности изнашивания на контактное выкрашивание было проведено при трении закаленных контрроликов по улучшенным образцам. Материал контрроликов – сталь 45. Объемная закалка 850–870 °С, отпуск – 180–200 °С, HRC 45.

Материал образцов – сталь 45. Термообработка: улучшенная закалка – 820–840 °С, отпуск – 520–530 °С, HRC 30.

Контактные напряжения рассчитаны по формуле Герца. При сжатии стальных

цилиндров, соприкасающихся по образующей, она имеет вид

$$p = 0,418 \sqrt{\frac{\vartheta \cdot E}{\rho_{\text{пр}}}}, \quad (1)$$

где ϑ – удельная нагрузка, Н/мм;
 $E = 2,15 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали;
 $\rho_{\text{пр}}$ – приведенный радиус кривизны контактирующих роликов, мм.

Суммарная окружная скорость V_E равна сумме окружных скоростей роликов V_1 и V_2 . Относительное проскальзывание $L = V_2 - V_2/V_1$.

Измерение величины износа производилось периодически на аналитических весах с точностью измерения $1 \cdot 10^{-4}$ г.

Периодичность измерения зависела от интенсивности изнашивания. В конце испытаний величину износа контролировали по снятой профилограмме поверхности. Для образцов основной серии ($L = 17\%$), размеры которых приведены на рис. 1, массовый износ 1 мг материала приблизительно соответствовал линейному износу в 1 мкм.

Испытания проводились на испытательной установке с замкнутым контуром, внешняя схема которой представлена на рис. 2, предназначенной для испытаний износостойкости роликовых цилиндрических образцов. Установка позволяет изменять следующие параметры, влияющие на интенсивность изнашивания: суммарную окружную скорость V_{Σ} , скорость скольжения $V_{\text{ск}}$, напряжения в контуре ρ , температуру и расход подаваемого в контакт масла. Самоустанавливающийся ролик-образец помещается между тремя контрольными роликами, при этом верхний контрольный является – нажимным, а нижние контрольные – опорные.

Принудительное (с помощью зубчатой передачи) вращение под нагрузкой, варьируя скорость вращения и величину проскальзывания, позволяет моделировать работу зубчатых передач. Принципы моделирования работы зубчатых передач с помощью роликовых аналогий описаны в работе [2] и других работах.

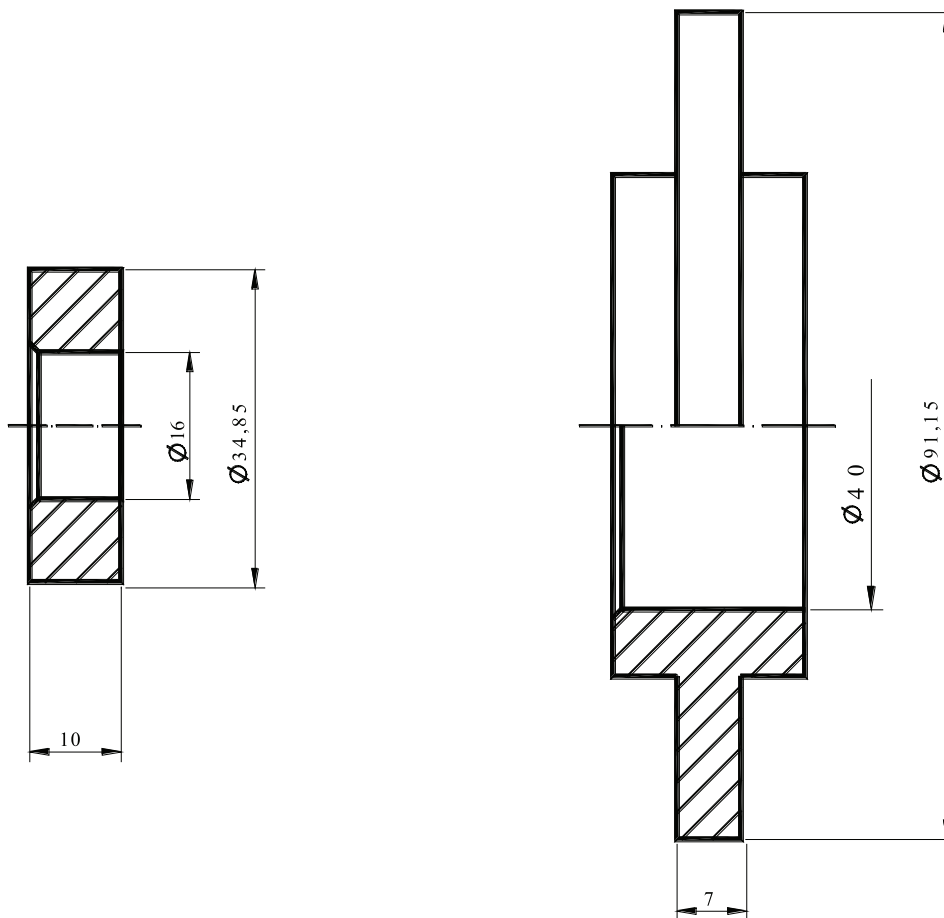


Рис. 1. Ролик – образец и контрольный

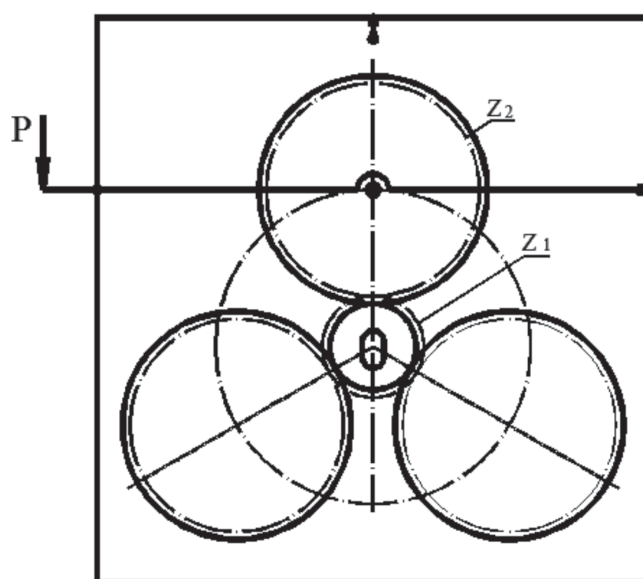


Рис. 2. Принципиальная схема установки с принудительным вращением роликов

В качестве критерия для определения числа циклов, соответствующих выкрашиванию, было принято появление начальных следов питтинга. Испытания проводились на четырех уровнях напряжений: $p = 652; 884; 1116; 1348$ МПа и трех уровнях скоростей: $V_{\Sigma} = 0,63; 1,26; 1,89$ м/с. Данные условия соответствовали режимам гидродинамического и смешанного трения [3]. Для каждой совокупности было испытано по 3 образца. Испытания дали следующие результаты. При напряжениях $p = 652$ МПа для всех V_{Σ} после $2 \cdot 10^6$ циклов, а для одного образца после 10^7 циклов выкрашивания, так как это напряжение меньше предела длительной прочности. При других уровнях напряжений выкрашивание возникло ранее, чем износ достигал значительной величины; при этом величина интенсивности изнашивания и износа не оказывала существенного влияния на сопротивление контактной усталости образцов. Об этом говорят полученные значения коэффициентов корреляции ρ , которые количественно характеризуют тесноту связи между случайными величинами: долговечностью образцов N и интенсивностью изнашивания J . Для $p = 884$ МПа при $V_{\Sigma} = 0,63; 1,26; 1,89$ м/с по результатам испытаний 9 образцов получили $\rho = 0,66$. Аналогично, при $p = 1116$ МПа значение $\rho = -0,374$ и при $p = 1348$ МПа значение $\rho = -0,65$. Полученные значения коэффициентов корреляции указывают на слабую функциональную связь между N и J , а различие знаков ρ говорит о трудности

установления вида этой связи или об отсутствии таковой вообще.

Отсутствие количественной связи между интенсивностью изнашивания и питтингом, по-видимому, можно объяснить следующим. Увеличение скорости изнашивания уменьшает вероятность питтинга из-за развития поверхностных трещин, однако само увеличение этой скорости может быть связано с ужесточением режима нагружения, например уменьшением толщины масляной пленки, а соответственно, увеличением динамической нагрузки и концентрации напряжений; при этом создаются более благоприятные условия для развития поверхностных трещин. При сравнительной малой интенсивности изнашивания, разрушения этих трещин вследствие износа не происходит. Увеличение скорости развития подповерхностных трещин и уменьшение вероятности питтинга из-за развития поверхностных трещин компенсируют друг друга. Иная картина наблюдается при значительном увеличении скорости износа, например, для неприработанных твердых контроллеров при трении по улучшенным образцам. При этом процесс изнашивания носит уже в основном не усталостный характер; происходит микрорезание твердыми микронеровностями контроллеров материала более мягких образцов. Величина интенсивности изнашивания при отсутствии приработки контроллер в зависимости от режима смазывания (жидкостное или граничное трение) может увеличиваться в десятки и сотни раз

по сравнению с приработанными. Например, при качении с проскальзыванием цементированных роликов по улучшенным образцам интенсивность изнашивания при $p = 884$ МПа и $V_{\Sigma} = 1,26$ м/с (что соответствует смешанному режиму трения) составила 856 мкм (10^6 циклов). Следы выкрашивания отсутствовали. В этом случае, как и в случае абразивного износа, из-за большой интенсивности изнашивания не успевают развиться не только поверхностные, но и подповерхностные трещины. Аналогичные результаты были получены также в отдельных экспериментах при трении цементированных контрроликков по закаленным образцам. Можно принять, что изнашивание не оказывает значительного влияния на контактную усталость до тех пор, пока само не становится критерием отказа. Однако для деталей с поверхностными упрочнением поверхности изнашивание оказывает влияние на сопротивление контактной усталости в результате истирания тонких упрочненных слоев и дальнейшего выкрашивания лежащих ниже слоев, обладающих меньшим сопротивлением контактной усталости. Изменяющиеся по мере износа поля напряжений делают трудным определение наиболее опасной точки учета для нее всей совокупности возникающих в течении работы напряжений. Эти трудности увеличивают

изменение твердости и интенсивности изнашивания во время работы. С учетом того, что при разрушении рекомендовано принять за наиболее опасную – точку максимальных касательных напряжений в конце всего цикла нагружений (рис. 3).

В запас надежности пойдет то, что касательные напряжения в этой точке в течение всей работы были меньше максимальных и только в конце достигли максимальных значений. Допускаемые напряжения для этой точки, с учетом имеющегося запаса надежности, могут быть приняты в соответствии с твердостью поверхности, получившейся в результате износа.

При износе поверхностно-упрочненных поверхностей увеличивается также вероятность отслаивания упрочненного слоя из-за уменьшения его толщины. Поэтому, например, при расчете на предотвращение глубинного контактного разрушения по ГОСТ 21354-87 [4] при определении параметра:

$$\varphi = \frac{h_t \cdot 10^4}{\rho_{\text{пр}} \cdot H_k}, \quad (2)$$

учитывающего влияние толщины упрочненного слоя δ_y , более правильным будет подставить значение δ_y , полученное с учетом износа. Для оценки величины износа могут быть использованы зависимости [5].

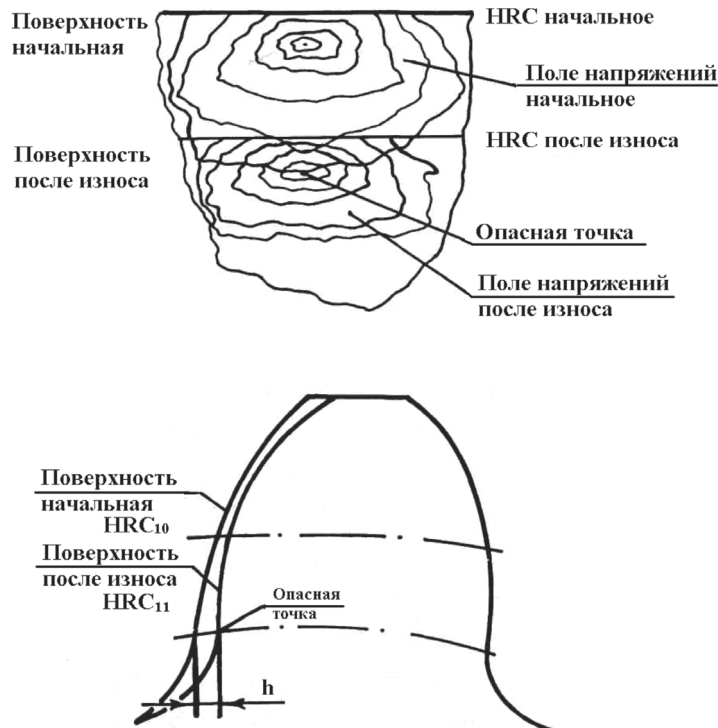


Рис. 3. Изменение положения опасной точки в процессе изнашивания

В случае совместного действия независимых причин, вызывающих отказы, вероятность безотказной работы:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (3)$$

где P_i – вероятность безотказной работы при действии i -ой причины.

Так как вероятность отказа вследствие износа влияет на вероятность отказа под

действием контактных или изгибающих напряжений, использовать эту зависимость напрямую нельзя.

Время безотказной работы τ (или число циклов N) при отказах вследствие износа, а также логарифм $\tau(N)$ при отказах из-за потери контактной или изгибной прочности имеют нормальное распределение.

Для анализа совместного распределения нормально распределенных величин применима зависимость Бернштейна:

$$f(z_1, z_2) = \frac{1}{2\pi \cdot S_{z_1} \cdot S_{z_2} \cdot \sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(\rho^2)} \left[\frac{(z_1-M_1)^2}{S_{z_1}^2} + \frac{(z_2-M_2)^2}{S_{z_2}^2} - 2\rho \cdot \frac{(z_1-M_1)(z_2-M_2)}{S_{z_1} \cdot S_{z_2}} \right]}, \quad (4)$$

где M_1 и M_2 – математические ожидания случайных величин z_1 и z_2 ;
 S_{z_1} и S_{z_2} – среднее квадратичное отклонение величин z_1 и z_2 ;
 ρ – коэффициент корреляций между z_1 и z_2 ;

$$\rho = \frac{cov(z_1, z_2)}{S_{z_1} \cdot S_{z_2}}, \quad (5)$$

где $cov(z_1, z_2)$ – ковариация случайных величин:

$$cov(z_1, z_2) = M(z_1 \cdot z_2) - M(z_1) \cdot M(z_2). \quad (6)$$

Плотность вероятности условного распределения случайной величины z_1 , т.е. плотность вероятности распределения z_1 при условии, что z_2 имеет плотность распределения $f(z_2)$;

$$f(z_1 / z_2) = f(z_1, z_2) / f(z_2). \quad (7)$$

Учитывая, что

$$f(z_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot f(z_2)} \cdot e^{-\frac{(z_1-M_1)^2}{2 \cdot S^2(z_1)}}, \quad (8)$$

из выражений (4), (7) и (8):

$$f(z_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S(z_2) \cdot \sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(S(z_2) \cdot \sqrt{1-\rho^2})^2} \left(z_2 - M_2 - \rho \frac{S(z_2)}{S(z_1)} (z_1 - M_1) \right)^2}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что условное распределение $f(z_1/z_2)$ является нормальным с математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением:

$$M(z_2 / z_1) = M_2 + \rho \frac{S(z_2)}{S(z_1)} \cdot (z_1 - M_1); \quad (10)$$

$$S(z_2 / z_1) = S(z_2) \cdot \sqrt{1-\rho^2}. \quad (11)$$

Выражения (9–11) дают возможность оценить параметры распределения логарифма времени τ (или числа циклов N) безотказной работы при отказах вследствие потери контактной или изгибной прочности в зависимости от износостойкости деталей. При этом они будут иметь вид

$$M(\lg N_0 / h) = \lg N_0 + \rho \frac{S(\lg N_0)}{S(h)} \cdot (h - M(h)); \quad (12)$$

$$S(\lg N_0 / h) = S(\lg N_0) \cdot \sqrt{1-\rho^2}. \quad (13)$$

Полученные параметры распределения можно в дальнейшем считать независимыми от износа.

По полученным параметрам условного распределения можно рассчитать вероятность безотказной работы при действии различных факторов, например изгибных или контактных напряжений, и вероятность безотказной работы зубчатой передачи в целом по формуле (3).

Список литературы

1. Проблемы оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования /

А.В. Баранов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 99–100.

2. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: Справочник / В.С. Комбалов. – М.: Инновационное машиностроение, 2008. – 384 с.

3. Доценко А.И. Основы трибологии / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. – М.: Инфра-М, 2014. – 336 с.

4. ГОСТ 21354-87 Передачи зубчатые цилиндрические внешнего зацепления. Расчет на прочность. – Взамен ГОСТ 21354-75; Введен с 01.01.1989. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 129 с.

5. Дроздов Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 603 с.