

А.Г. ПРИЙМАКОВ, канд. техн. наук, Харьковский университет воздушных сил Вооруженных сил Украины,
А.В. УСТИНЕНКО, канд. техн. наук, НТУ „ХПИ”,
В.Н. СТАДНИЧЕНКО, канд. техн. наук, Национальный авиационный университет, г. Киев

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НЕСУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Розглянуто зносостійкість поверхневого шару зубців та кінетику їх руйнування, виходячи із теорії пластичності та фізики твердого тіла. Встановлено зв'язок між параметрами зносостійкості та напружено-деформованим станом контактуючих поверхонь під навантаженням. Отримано граничне значення деформацій в процесі зношування і, тим самим, визначено умову Гріффітса для контактних задач.

The endurance of teeth surface stratum and kinetics of their destruction is considered, going out from the theory of plasticity and physics of solid. Connection is set between the endurance parameters and stress-strain state of contacting surfaces on-loading. The maximum value of deformations is got in the process of wear and, the same, certainly Griffiths condition for contact tasks.

Введение. Износ поверхностного слоя (ПС) несущих поверхностей зубчатых передач является результатом сложного движения вещества ПС вследствие протекания процессов пластического течения и разрушения, развивающихся одновременно на разных масштабных уровнях.

Сложная структура ПС определяет эффекты запаздывания с практически непрерывным спектром времен запаздывания. С ростом контактного давления скорость перемещения вещества вдоль ПС и скорость выноса уменьшаются. Однако, в результате возрастания толщины ПС количество перемещающегося вещества может увеличиться.

Основные процессы изнашивания и диспергирования происходят именно в ПС, как это показано в работах [1, 2, 3].

Анализ научных публикаций показывает, что износостойкость несущих поверхностей зубчатых передач с позиций теории пластичности и кинетика их разрушения исследуются впервые.

Цель статьи – исследование износостойкости ПС зубьев и кинетики их разрушения, исходя из теории пластичности и физики твердого тела.

Износостойкость несущих поверхностей зубьев с позиций теории пластичности. Рассмотрим ПС как некоторую среду, структурные особенности которой определяются:

- формой, размерами и статистическим размещением пор, образованных пустотами между контактирующими микронеровностями;
- границами раздела между контактирующими телами в пределах пятен контакта;

- зернами, включениями, субмикропорами и их границами в объемах материала, вовлеченных в пластическую деформацию при трении несущих поверхностей зубчатых передач.

Перечисленные дефекты имеют разные масштабы. Такая иерархия масштабов дефектов, в основе которой лежат явления разной природы, требует рассмотрения процессов пластического течения на разных масштабных уровнях, причем при переходе с низшего уровня на высший необходимо статистическое усреднение предыдущего уровня. Усреднение явлений низшего иерархического уровня по отношению к высшему эквивалентно системе уравновешенных полей микронапряжений, возникающих в усредненных областях. Развитие этих дефектов в процессе пластического течения происходит в условиях локального перераспределения макроскопических величин, которое должно учитываться введением в расчетные модели соответствующих структурных параметров.

При относительном сдвиге тел трения в пределах их контакта возникает пластическое течение, охватывающее определенный объем V . Будем считать, что это течение может быть описано тензорами напряжений $T_{\sigma}(\bar{r})$ и скоростей деформации $T_{\xi}(\bar{r})$, являющимися функциями координаты r . Тогда макроскопические (средние) напряжения и скорости деформации могут быть выражены через микроскопические (структурные) уравнения [3, 4]:

$$T_{\sigma} = \frac{1}{\nu} \int_{\nu} T_{\sigma} d\nu; \quad T_{\xi} = \frac{1}{\nu} \int_{\nu} T_{\xi} d\nu, \quad (1)$$

где ν – пористость, то есть отношение объема пустот к объему V .

С другой стороны

$$T_{\sigma} = T_{\sigma}^0 + T'_{\sigma}; \quad T_{\xi} = T_{\xi}^0 + T'_{\xi} = \mu T_{\xi}^0, \quad (2)$$

где T_{σ}^0, T_{ξ}^0 – макроскопические тензоры напряжений и скоростей деформации; T'_{σ}, T'_{ξ} – средние значения тензоров микронапряжений и скоростей микродеформации; μ – параметр распределения микродеформации.

Считая, что в пределах объема V значения T_{σ}^0 и T_{ξ}^0 постоянны, усредним эти значения по ансамблю их реализации. Если

$$\langle T'_{\sigma} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{N} T'_{\sigma}; \quad \langle \mu \rangle = \frac{1}{N} \sum_{N} \mu, \quad (3)$$

то

$$\langle T_{\sigma} \rangle = T_{\sigma}^0 + \langle T'_{\sigma} \rangle; \quad \langle T_{\xi} \rangle = \langle \mu \rangle T_{\xi}^0, \quad (4)$$

где $\langle T_{\sigma} \rangle, \langle T_{\xi} \rangle$ – эффективные значения напряжений и скоростей деформации.

Согласно [3, 5] условие пластичности для пористых тел имеет вид

$$\gamma J'_2 + \alpha J_1^2 = k^2, \quad J_1 = \langle \sigma \rangle = \frac{1}{3} \langle \sigma_{ii} \rangle; \quad J'_2 = (\langle \sigma_{ij} \rangle \langle \sigma_{ij} \rangle)^{1/2}, \quad (5)$$

где α, γ – функции пористости [2, 3]; k – константа [2].

Рассматривая уравнения (3) и (5) совместно с ассоциированным законом пластического течения

$$\xi_{ij} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \lambda \geq 0, \quad (6)$$

получим кинетическое уравнение изменения пористости в процессе пластического течения:

$$d\nu = \left(\frac{9\sqrt{3}\alpha(\bar{\nu})\mu}{\gamma(\bar{\nu})\sigma_s} \langle \sigma' \rangle + \frac{9\sqrt{3}\alpha(\bar{\nu})\mu}{\gamma(\bar{\nu})\sigma_s} \sigma_0 \right) dP = \beta dP, \quad (7)$$

где dP – прирост интенсивности пластической деформации макроскопического поля; σ_s – предел текучести материала матрицы; β – коэффициент уравнения закона трения Амонтона-Кулона [1, 8].

Согласно [6, 8]

$$\frac{\langle \sigma' \rangle}{\sigma_s} = \frac{\langle \Pi \rangle \langle \mu \rangle P}{\sigma_s} \cong \text{const}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что на стадии разрыхления $\beta \cong \text{const}$ и независимо от знака приложенного напряжения в пластической области структурно-неоднородной среды на более прочных элементах этой среды действуют растягивающие микронапряжения. Это обуславливает зарождение трещин и появление неустойчивости течения при больших пластических деформациях. Следовательно, пластический сдвиг в структурно-неоднородной среде сопровождается ее разрыхлением и увеличением объема.

Напряжения течения пластической среды согласно [7, 8] описываются уравнениями

$$\tau = \tau + \beta \sigma_0; \quad (9)$$

$$d\nu = \beta dP = (\beta' + \beta'' \sigma_0) dP. \quad (10)$$

Сравнивая уравнения (10) и (7), замечаем, что β в (9) можно рассматривать как обобщенный параметр структурной неоднородности пластичнодеформируемого твердого тела.

Уравнение (9) является формой записи закона трения Амонтона-Кулона и характеризует связь между напряжением течения в ПС и сжимающим его давлением. Как следствие, относительный сдвиг контактирующих твердых тел сопровождается изменением объема вещества ПС, пропорциональным

коэффициенту β . Последний зависит от гидростатического сжатия, с ростом которого значения β уменьшаются, соответственно, уменьшается скорость разрыхления и разрушения вещества ПС.

Примем, что некоторый параметр ε характеризует увеличение толщины ПС H в результате разрыхления вещества ПС. Вынос вещества за его пределы описывается некоторой функцией, которая превращается в нуль при $H=0$ и монотонно следует к ∞ вместе с H . Положив $F(H) = \theta H$, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dH}{dt} = (\varepsilon - \theta H)H, \quad (11)$$

где $\varepsilon = \varepsilon[\sigma, \bar{\nu}, \beta(\sigma)]$; $\theta = \theta[\bar{\nu}, \beta(\sigma)]$; t – время.

Решением этого уравнения является известная „логистическая кривая” [9]:

$$H(t) = \varepsilon / (\theta - \varepsilon e^{-\varepsilon t}). \quad (12)$$

В результате конкуренции этих двух процессов толщина ПС при $t \rightarrow \infty$ стремится к предельному значению независимо от начальной толщины.

Состояние ПС наиболее полно отображает интегродифференциальное уравнение

$$\frac{dH}{dt} = \left\{ \varepsilon - \theta H + m \sin \nu t + a - \int_0^t H(\tau) f(t - \tau) d\tau \right\} H, \quad (13)$$

где $m \sin \nu t$ – отображает периодическое разрушение вторичных структур; интеграл – эффекты запаздывания, a – эмиграционный член, который учитывает попадание внешних частиц.

Можно и далее усложнять модель, однако, с практической точки зрения это нецелесообразно.

Изменение размеров фрикционного контакта в результате изнашивания можно оценить так:

$$\frac{dy}{dt} = -\varepsilon + \bar{\nu}^* H'(t), \quad (14)$$

где $\bar{\nu}^*$ – критическое значение разрыхления.

Графическая интерпретация решения уравнения (14) представлена на рисунке, причем кривая I показывает кинетику износа в фрикционном контакте жесткого твердого тела, а кривая II – упругопластичного тела.

Подведем некоторые итоги:

1. Фрикционный контакт является диссипативной структурой, в результате взаимодействия элементов которой его масса уменьшается. Его состоя-

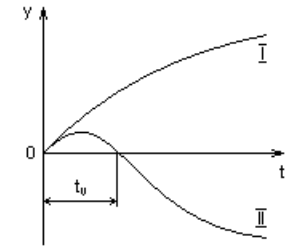


Рисунок. Решение уравнения (14)

ние зависит от внешних воздействий, времени и предыстории нагружения, то есть представляет собой марковский процесс. Массовый и линейный износ не является величинами, значение которых равны с точностью до постоянно-го коэффициента; массовый износ всегда отрицательный, линейный же может быть положительным.

2. Анализ движения вещества в ПС показывает, что при монотонном уменьшении масштаба усреднения в указанных пределах параметры уравнений (11), (13) изменяют свои значения скачкообразно, а при определенных значениях могут даже поменять знаки.

3. Положительный износ, подобно термоупругим эффектам, перепределяет давление между элементами контактирующих поверхностей, что порождает неустойчивость изнашивания поверхностей зубьев в передачах зацеплением.

Кинетика разрушения ПС с позиций физики твердого тела. Схему разрушения поверхностей трения можно представить следующим образом. Под действием касательных напряжений в кристаллах твердого тела происходит движение дислокаций, их генерация, а при достаточно высокой плотности – аннигиляция. Эти два процесса определяют скорость накопления дислокаций и других дефектов кристаллической структуры. При накоплении дислокаций возникают субмикротрещины, длина которых зависит от количества соединенных дислокаций. По мере увеличения касательных напряжений микротрещины „подрастают” до тех пор, пока не реализуется условие Гриффитса [5, 8], и не начнет происходить катастрофическое распространение микротрещин под действием нормальных напряжений. Отделение частиц износа может происходить за счет пересечения деформационных микротрещин.

Рассмотрим кинетику разрушения однофазных поликристаллических твердых тел при одноосном растяжении с образованием микротрещин на границах зерен, что характерно для конструкционных материалов.

Накопление дислокаций на границе зерна при деформации поликристалла описывается уравнением [5, 8]

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} = \frac{F}{\Gamma db} (1 - A\rho), \quad (15)$$

где ρ – плотность дислокаций; ε – степень деформации, Γ – коэффициент формы зерна; b – вектор Бюргерса; A – величина, обратно пропорциональная максимально возможной плотности дислокаций в кристалле; F – коэффициент, учитывающий форму дислокационных петель.

Проинтегрировав выражение (15) и определив значения постоянных интегрирования при начальных условиях $\varepsilon=0$; $\rho=\rho_0$, получаем уравнение, связывающее степень деформации ε с плотностью дислокаций в кристалле:

$$\varepsilon = \frac{\Gamma db}{FA} \ln \frac{1 - A\rho_0}{1 - A\rho}. \quad (16)$$

Разложив в ряд $\ln[(1 - A\rho_0)/(1 - A\rho)]$ и ограничиваясь лишь первыми членами, приведем (16) к виду

$$\varepsilon = \frac{\Gamma db}{F} (\rho - \rho_0). \quad (17)$$

Плотность дислокаций ρ в формуле (17) связана с величиной касательных напряжений в плоскости скольжения выражением [2, 4]:

$$\tau - \tau_v = \alpha G b \sqrt{\rho}, \quad (18)$$

где α – фактор междислокационного взаимодействия, зависящий от типа решетки; G – модуль сдвига; τ_v – напряжения от трения в решетке недислокационной природы.

Подставляя (18) в (17), получаем зависимость уровня деформации от величины касательных напряжений в однофазном поликристаллическом материале:

$$\varepsilon = \frac{\Gamma db}{F} \left[\left(\frac{\tau - \tau_v}{\alpha G b} \right)^2 - \rho_0 \right]. \quad (19)$$

Выполним оценку относительного удлинения при разрыве поликристаллической структуры, содержащей вторую фазу. Интенсивность накопления дислокаций на границах зерен и частицах второй фазы с учетом аннигиляции описывается уравнением [2, 4]

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{b} \left(\frac{F}{\Gamma d} + \frac{\pi \delta}{\lambda^2} \right) (1 - A\rho), \quad (20)$$

где d – размер зоны сдвига; δ – размер частиц второй фазы; λ – расстояние между частицами.

Составляющая $\pi \delta / \lambda^2$ учитывает образование дислокационных призматических петель вокруг частиц второй фазы. Интегрируя уравнение (20) и подставляя значение постоянной интегрирования, получаем уровень деформации ε :

$$\varepsilon = \frac{b(\rho - \rho_0)}{F/\Gamma d + \pi \delta / \lambda^2}. \quad (21)$$

Представив концентрацию частиц второй фазы $A_y = \pi \delta^2 / \lambda^2$ и приняв $\rho = \rho_{кр}$, приведем (21) к виду

$$\varepsilon_0 = \frac{db(\rho_{кр} - \rho_0)}{F/\Gamma + dA_y/\delta}, \quad (22)$$

где ε_0 – относительное удлинение при разрыве.

Уравнение (22) позволяет оценить предельное значение деформации двухфазного поликристаллического твердого тела. Сравнивая (22) и (17), замечаем, что они отличаются дополнением в знаменателе, который учитывает наличие частиц второй фазы.

Учитывая, что отделение частиц износа обуславливается процессами структурной повреждаемости, интенсивность поверхностного разрушения в зависимости от физико-механических свойств материала может быть представлена комилексом [5, 8]

$$I \sim \left(HB^{\frac{1+Rt}{1-Rt}} \cdot \epsilon_0^t \right)^{-1}, \quad (23)$$

где R – параметр шероховатости; t – показатель фрикционной усталости в классическом уравнении Велера; HB – твердость по Брюнелю.

Подставляя (19) в (23) и учитывая $\Gamma/f = \text{const}$, получим для однофазных поликристаллических твердых тел (конструкционные стали)

$$I \sim \left[HB^{1,75} d^2 b^2 (\rho_{\text{кр}} - \rho_0)^2 \right]^{-1}. \quad (24)$$

Вводя физико-математический комилекс Π , получаем

$$I \sim \frac{\left(\frac{F}{\Gamma} + \frac{dAy}{\delta} \right)^2}{HB^{1,75} [db(\rho_{\text{кр}} - \rho_0)]^2} = \Pi. \quad (25)$$

Согласно работе [5] регрессионное уравнение, описывающее связь комилекса Π с интенсивностью изнашивания I , принимает вид:

$$I = 0,51 \cdot 10^{-9} + 1,52 \cdot 10^{-20} \Pi. \quad (26)$$

Адекватность уравнения (26) там же проверена по F -критерию.

Зависимости, связывающие интенсивность поверхностного разрушения твердых тел с параметрами микроструктуры и фазового состава, являются инвариантными и показывают, что основные процессы изнашивания с позиций физики твердого тела происходят в поверхностном слое.

Выводы.

1. Впервые получено граничное значение деформаций в процессе изнашивания и, тем самым, определено условие Гриффитса для герцевских контактных задач.

2. Износостойкость несущих поверхностей зубьев должна учитываться при определении допускаемых напряжений зубчатых пар и при выборе материалов этих пар.

3. Установлена связь между параметрами износостойкости и напряженно-деформированным состоянием контактирующих поверхностей под нагрузкой с позиций теории пластичности и физики твердого тела.

Список литературы: 1. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 263с. 2. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. – М.: Мир, 1981 – 134с. 3. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 255с. 4. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 319с. 5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Наука, 1989. – 931с. 6. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Бобровицкий О.В. Прогнозування надійності довговічності літальних апаратів // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2004. – Вып.24. – С.77–83. 7. Приймаков А.Г. Устиненко А.В. Математическая модель анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и его устойчивости на поверхностях трения при определении допускаемых напряжений // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. научн. трудов. Тем. вып. "Проблемы механического привода". – 2005. – Вып.40. – С.65–77. 8. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712с. 9. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 363с.

Поступила в редколлегию 09.06.07

УДК 539.3

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, **Г.Д. ГРИЦЕНКО**, канд. техн. наук, **А.В. МАРТЫНЕНКО**, НТУ „ХПИ”, **А.В. НЕЧЕПУРЕНКО**, канд. техн. наук, ОАО „МК „Азовсталь””, г. Мариуполь, **Т.В. ПОЛИЩУК**, канд. техн. наук, ОАО „Азовмаш”, г. Мариуполь

К ВОПРОСУ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Запропоновано нові підходи до проектування і дослідження елементів складних механічних систем. Основна ідея полягає в застосуванні наскрізної параметризації на всіх етапах проектування. У просторі змінних параметрів шукається рішення оптимізаційної задачі за критеріями міцності, жорсткості і мінімальної маси.

New approaches to design and research of the complicated mechanical systems elements are offered. The main idea lies in application of through parameterization at all design phases. Within the varied parameter space we search for optimization problem solution based on strength, rigidity and minimum mass criteria.

Введение. При формулировке задачи расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов