

УДК 621.891

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОСИСТЕМ С УЧЕТОМ ГРАДИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ*канд. техн. наук, доц. О.А. МИКОСЯНЧИК**(Национальный авиационный университет, Киев, Украина);**д-р техн. наук, проф. Б.А. ЛЯШЕНКО**(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко, Киев, Украина);**д-р техн. наук, доц. Н.О. КУЗИН**(Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, Украина);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается практическое применение методики прогнозирования оптимальной структуры поверхностных слоев, образующейся в процессе эксплуатации элементов трибосопряжения. Методика основана на определении усредненного значения микротвердости приповерхностных слоев материала в некоторой рассматриваемой локальной области деформируемого при трении объема контактных поверхностей глубиной до 80 мкм. Показана возможность прогнозирования износа контактных поверхностей в условиях качения с различной степенью проскальзывания, зависящей от величины эффективной («интегральной») микротвердости, учитывающей микротвердость поверхностных слоев металла в процессе структурной приспособляемости при трении и градиентность распределения микротвердости по глубине деформируемого слоя. Установлена корреляционная взаимосвязь между износом элементов трибосопряжения и значениями микротвердости поверхностных слоев трибосистем и градиентным ее распределением, позволяющая разрабатывать практические рекомендации по режимам технологической и эксплуатационной модификации элементов узлов трения.

Ключевые слова: *трибосистема, трибосопряжение, контактная поверхность, корреляционная связь, эвольвентный профиль, трибоконтакт, износ, питтинг, микротвердость.*

Установление оптимальных параметров структуры поверхностных слоев контактирующих пар и прогнозирование их эксплуатационных характеристик на основе распределения механических свойств в элементах конструкций – важнейшие проблемы современной трибологии. При этом ограниченное количество экспериментальных данных, которые позволяют устанавливать связь между структурой поверхностных слоев и поведением трибосистем, сложность физико-химических процессов, сопровождающих явление фрикционного взаимодействия, существенно затрудняют выделение основных факторов, имеющих определяющее значение для работы контактных пар [1]. Данное обстоятельство существенно ограничивает управление технологическими режимами модификации поверхностей, особенно в случае использования аддитивных технологий, и как результат, приводит к ограничению информации, необходимой для разработки рекомендаций по поверхностному упрочнению деталей узлов трения, которая восполняется принятием решений на основе инженерной интуиции или практического опыта.

Анализ публикаций и постановка проблемы. Причиной неравномерного износа эвольвентных зубчатых передач является непостоянство условий трения для всех точек контактирующих поверхностей вдоль эвольвентного профиля. Поверхностные слои в процессе эксплуатации зубчатых колес разрушаются в результате циклического действия изгибающих напряжений и изнашивания от проскальзывания контактирующих поверхностей по линии зацепления к вершине (корню) зуба. Износ полюсной и околополюсной зоны в зависимости от твердости материала, контактных нагрузок и скорости рассмотрен в работе [2], о наличии пластических деформаций в указанных зонах вследствие искажения эвольвентного профиля при износе можно судить по высокой степени наклепа материала [3].

При использовании в качестве смазочного материала для средне- и высоконагруженных зубчатых передач трансмиссионных масел с активными компонентами противоизносных и противозадирных присадок существенно изменяются механохимические свойства трибоконтакта. Первичный процесс пластифицирования материала при адсорбции поверхностно-активных веществ заканчивается стадией значительного упрочнения поверхностного слоя металла [4]. Упрочнение поверхностного слоя в активной смазочной среде оказывает экранирующее действие для распространения вглубь металла пластической деформации [5]. В работе [6] установлена взаимосвязь между переходом пластической деформации, обуславливающей интенсификацию износа, и упругой, характеризующейся минимальным износом и этапами формирования защитных прочных граничных смазочных слоев. Опыт эксплуатации зубчатых передач

показывает, что контактная выносливость поверхностей зубьев зависит от толщины смазочных слоев, которые, в свою очередь, влияют на силы трения и напряженное состояние в контакте [7]. В работе [8] установлена прямая корреляция развития усталостных повреждений (питтинга и растрескивания) поверхностных слоев металла зубчатых передач с параметрами смазочного действия и шероховатостью контактных поверхностей.

Контактные условия предопределяют зарождение трещин на поверхности или в подповерхностных слоях боковых поверхностей зубьев. Распространение трещин может привести к отказу вследствие проявления питтинга, отслаивания либо излома кромки зуба [9].

Согласно [10], для условий качения и качения со скольжением сопротивление усталости зависит от различных факторов, таких как упругопластическая деформация, свойства материала контактных поверхностей, физико-химические свойства смазочного материала, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, нагрузочно-скоростные параметры контакта. При этом зарождение трещин может проявляться вблизи поверхности деформированной зоны либо в области максимального циклического напряжения сдвига. В работе [11] представлена математическая модель определения максимальных касательных напряжений в эластогидродинамическом контакте. Зависимость градиента распространения касательных напряжений по глубине от геометрических параметров зубчатых передач и нагрузки рассмотрена в работе [12].

Таким образом, проведенный краткий анализ научных исследований, связанных с установлением закономерностей между смазочным действием, локализацией максимальных касательных напряжений и износостойкостью пар трения, показал, что не существует единого мнения о влиянии указанных параметров на износ неконформных узлов трения. В связи с этим необходима разработка единых научно обоснованных и совершенных с технической точки зрения комплексных методик триботехнических испытаний, которые бы охватывали многообразие эффектов взаимодействия компонентов смазочных материалов с активированной поверхностью металла. Исследования пар трения качения, особенно пар качения с переменным проскальзыванием, составляющих значительную долю узлов трения машин и механизмов (подшипники качения, зубчатые передачи), немногочисленны, недостаточно изучены и нуждаются в дальнейшем углубленном анализе.

В этой связи актуальной является разработка математических подходов по установлению оптимальных параметров поверхностных слоев контактных пар, опираясь на ограниченную информацию результатов натурных испытаний. Разработка методики прогнозирования износа элементов трибосопряжения на основе оценки изменения микротвердости приповерхностных слоев металла в локальной деформируемой области при структурной приспособляемости контактных поверхностей в нестационарных условиях трения качения с переменным скольжением и явилась целью представляемой работы.

Материалы и методика исследования триботехнических характеристик контакта. Исследования проводились на автоматизированном комплексе для оценки триботехнических характеристик трибозвеньев [13].

Методика оценки распространения упругопластической деформации в приповерхностных слоях металла заключается в следующем:

- провести приработку контактных поверхностей в нестационарных условиях трения (режим пуск – остановка);
- провести наработку до стабилизации основных триботехнических показателей контакта (толщины смазочного слоя при остановке, в пусковой период и в период, соответствующий выбранным максимальным скоростям качения опережающей и отстающей поверхностей; коэффициента трения; удельной работы трения), которые характеризуют формирование стабильного граничного слоя компонентами смазочного материала;
- прекратить подачу смазочного материала в зону трения, при этом ветошью удалить остатки смазочного материала с контактных поверхностей;
- фиксировать изменение основных триботехнических показателей контакта до проявления первых признаков схватывания контактных поверхностей;
- на приборе ПМТ-3 провести измерения микротвердости приповерхностных слоев металла на глубину до 300 мкм по всей длине контакта элементов трибосопряжения для определения ее 3D-функционального распределения (градиентности).

Момент трения, частота оборотов роликов, температура смазочного материала, падение напряжения в смазочном слое в контакте записываются и обрабатываются на персональном компьютере (программное обеспечение ProfiLab) в реальном масштабе времени с графическим изображением их изменений.

Исследуемые нестационарные условия трения подразумевают цикличность проведения экспериментов в режиме «запуск – стационарная работа – торможение – остановка».

Максимальная частота оборотов для опережающей поверхности составила 1000 об/мин. В работе имитировалось проскальзывание 3, 10, 20, 30 и 40%. Максимальное контактное напряжение по Герцу

составило 250 МПа. В качестве образцов использовались ролики из стали 45 (HRC 38, Ra 0,57 мкм). Смазывание контактных поверхностей осуществлялось путем окунания нижнего ролика в ванночку с маслом. В качестве смазочного материала использовалось минеральное трансмиссионное масло для механических коробок передач и главных передач легковых и грузовых автомобилей Okko GL-4 80w/90. Объемная температура масла составляла 20 °С.

Результаты и их обсуждение

Набор эмпирической информации. В качестве исходной информации для прогнозирования оптимальной структуры поверхностных слоев использовали распределение измерения микротвердости, полученное на образцах, работавших в нестационарных условиях трения при качении с разной степенью проскальзывания, а также величину суммарного износа этих образцов (табл. 1).

Таблица 1. – Результаты измерения микротвердости по образцам и их эксплуатационные характеристики

| Образец | Величина микротвердости HV, МПа | | | | | | | | Суммарный износ опережающей и отстающей поверхностей, мкм |
|---------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| | Расстояние от поверхности, мкм | | | | | | | | |
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | |
| Образец 1 (проскальзывание 3%) | 3451 | 3451 | 3451 | 3708 | 3708 | 3853 | 4010 | 4179 | 5,96 |
| Образец 2 (проскальзывание 10%) | 3575 | 4564 | 5570 | 5570 | 5287 | 5023 | 5023 | 4783 | 3,83 |
| Образец 3 (проскальзывание 20%) | 3336 | 3451 | 3575 | 3853 | 5899 | 5570 | 5570 | 5570 | 4,27 |
| Образец 4 (проскальзывание 30%) | 4023 | 5023 | 5287 | 5287 | 5570 | 6255 | 6255 | 7095 | 5,08 |
| Образец 5 (проскальзывание 40%) | 4023 | 5287 | 5287 | 5287 | 5570 | 5570 | 6255 | 6255 | 6,11 |

Подход к прогнозированию. Для установления оптимальных параметров структуры поверхностных слоев, согласно работе [14], априори приняли, что эксплуатационные свойства материала (износ) зависят как от характеристик микротвердости поверхностных слоев, так и от распределения их вглубь материала:

$$I = F(HV(x)), \quad (1)$$

где HV – микротвердость; x – переменная, описывающая расстояние вглубь от поверхности детали.

Поэтому в качестве меры функции $F(HV(x))$ приняли интегральное осреднение распределения микротвердости [14]:

$$F(HV(x)) = HV_{эф} = \frac{1}{L} \int_L HV(x) dx, \quad (2)$$

где L – величина рассматриваемой характерной глубины (примем $L \approx 80$ мкм).

В линейном приближении функция $HV(x)$ имеет вид:

$$HV(x) = HV_0 + k \cdot x, \quad (3)$$

где HV_0 – микротвердость на поверхности, МПа; k – величина градиента микротвердости, МПа/мкм.

Степень упрочнения приповерхностных слоев металла на некоторую глубину зависит от скорости скольжения контактных поверхностей. С повышением скорости скольжения от 0,062 до 1,15 м/с, что соответствует увеличению степени проскальзывания с 3 до 40% соответственно, интенсифицируются процессы тепловыделения во фрикционном контакте, возрастает градиент скорости сдвига смазочных слоев, в результате чего создаются предпосылки для деструкции сформированных граничных пленок смазочного материала. Вследствие этого увеличивается область распространения касательных напряжений сдвига вглубь металла и возникают локальные участки напряженно-деформированного состояния приповерхностных слоев, в которых независимо от скорости скольжения опережающей и отстающей поверхностей реализуется правило положительного градиента механических свойств по глубине, повышая тем самым износостойкость пар трения.

С учетом (3) соотношение (2) имеет вид:

$$HV_{эф} = F(HV(x)) = \frac{1}{L} \left(HV_0 \cdot L + k \cdot \frac{L^2}{2} \right) = HV_0 + k \cdot \frac{L}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, рассматриваемый параметр эффективной микротвердости представляет собой осредненный показатель распределения микротвердости в некоторой локальной области, охватывающей

глубину распространения упругопластических деформаций при трении. Данный параметр является прочностным критерием, характеризующим пространственную неоднородность распределения микротвердости в результате эксплуатационной модификации контактных поверхностей при трении.

В качестве величины микротвердости на поверхности примем значение микротвердости на глубине 10 мкм (см. таблицу 1), а градиент определим как отношение разницы значений микротвердости на глубине 80 и 10 мкм к значению разницы глубин (80...10) мкм. В результате получим зависимость износа от эффективной микротвердости, поверхностной микротвердости и градиента. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Зависимость эксплуатационных характеристик материала от обобщенных параметров распределения микротвердости

| Образец | Поверхностная микротвердость, МПа | Градиент, МПа/мкм | Эффективная микротвердость, МПа | Суммарный износ опережающей и отстающей поверхностей, мкм |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------|---|
| Образец 1 (проскальзывание 3%) | 3451 | 10,4 | 3857 | 5,96 |
| Образец 2 (проскальзывание 10%) | 3575 | 17,2 | 4263 | 3,83 |
| Образец 3 (проскальзывание 20%) | 3336 | 31,9 | 4612 | 4,27 |
| Образец 4 (проскальзывание 30%) | 4023 | 43,8 | 5775 | 5,08 |
| Образец 5 (проскальзывание 40%) | 4023 | 31,8 | 5295 | 6,11 |

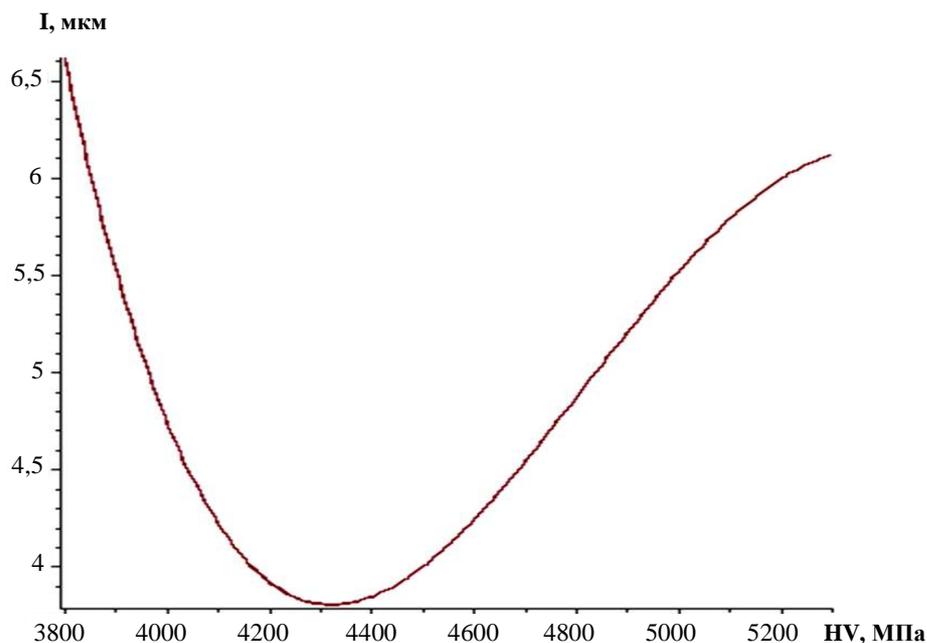
Результаты прогнозирования

Найдем аналитическую зависимость величины износа I от $HV_{эф}$:

$$I = 7,074211011 \cdot 10^{(-13)} \cdot h^4 - 1,778035727 \cdot 10^{(-8)} \cdot h^3 + 0,1584466714 \cdot 10^{(-3)} \cdot h^2 - 0,6016932517 \cdot h + 833,2181630, \quad (5)$$

где h – эффективная («интегральная») микротвердость.

Зависимость величины $I(h)$ представим графически на рисунке.



Зависимость износа I от параметра $HV_{эф}$

Как видно из представленного выше рисунка, зависимость имеет минимум величины износа при значении микротвердости в интервале от 4200 до 4400 МПа.

Решим задачу по нахождению величины $HV_{эф}^*$, обеспечивающей минимальную величину износа:

$$HV_{эф}^* : I \rightarrow \min. \quad (6)$$

Задача вида (6) эквивалентна следующей системе уравнений:

$$HV_{эф}^* : \begin{cases} \frac{\partial I}{\partial HV} = 0, \\ \frac{\partial^2 I}{\partial HV^2} > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Из данной системы найдем $HV_{эф}^* = 4323$ МПа. При этом прогнозируемое значение износа будет на уровне 3,80 мкм.

Отметим, что получить заданное значение эффективной микротвердости, при которой максимально уменьшается износ пары трения, можно как при помощи изменения величины поверхностной микротвердости, так и при помощи регулирования значения ее градиента.

Например, при заданном значении микротвердости 3575 МПа значение градиента микротвердости должно быть равным

$$k = \frac{2 \cdot (4323 - 3575)}{80} = 18,7 \text{ МПа / мкм.}$$

При значении градиента 17,2 МПа / мкм значение поверхностной микротвердости составит

$$HV_0 = \left(4323 - \frac{1}{2} \cdot 17,2 \cdot 80 \right) = 3635 \text{ МПа.}$$

Заключение. В результате проведенного исследования рассмотрена проблема установления оптимальных структурных параметров трибосистем на основе ограниченной информации натуральных испытаний и сделаны следующие *выводы*:

- в качестве меры функционального распределения свойств поверхностных слоев принято интегральное осреднение значения микротвердости, которое сопоставляется с износом узла трения;
- предложенная методика позволяет определить оптимальные значения микротвердости как поверхностных слоев трибосистем, так и значение их градиента и дать практические рекомендации по режимам технологической и эксплуатационной модификации элементов узлов трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / Б.А. Ляшенко [и др.] ; под ред. В.В. Харченко. – К. : Ин-т проблем прочности, 2010. – 193 с.
2. Ognjanovic M. Progressive Gear Teeth Wear and Failure Probability Modeling / M. Ognjanovic // Tribology in industry. – 2004. – Vol. 26, № 3&4. – P. 44–49.
3. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования / А.П. Бурдуков [и др.] // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 99–105.
4. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C60 к моторному маслу / Н.Ф. Дмитриченко [и др.] // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 550–555.
5. Surfactant effects on the residual internal stresses in hydrated mineral binders / E.D. Shchukin [et al.] // Abstracts of the 13-th International Symposium on Surfactants in Solution, Gainesville, Florida, June 11–16, 2000. – P. 163.
6. Механизм формирования защитного граничного смазочного слоя / Б.И. Ковальский [и др.] // Изв. ТулГУ : Технические науки. – 2014. – Вып. 3. – С. 26–32.
7. Hutchings, I.M. Tribology: friction and wear of engineering materials / I.M. Hutchings ; ed. Butterworth. – Heinemann, Oxford, 1992. – P. 58–76.

8. Magalhães, L. Austempered ductile iron (ADI) gears : Power loss, pitting and micropitting / L. Magalhães, J. Seabra and R. Martins // *Wear*. – 2007. – Vol. 264. – P. 839–849.
9. Cheng, H.S. Elastohydrodynamic Lubrication, in *Handbook of lubrication* / H.S. Cheng, E.R. Booser ; Ed. CRC Pres : Boca Raton, 1983. – P. 155–160.
10. A fracture mechanics model for the analysis of micro-pitting in regard to lubricated rolling – sliding contact problems / B. Zafosnik [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29, Iss. 9–11. – P. 1950–1958.
11. Sadeghi, F. Subsurface Stresses in Rolling / Sliding Machine Components / F. Sadeghi, C. Ping Sui // *International Compressor Engineering Conference*, 1988. – P. 680.
12. Tobie, T. Case Depth and Load Capacity of Case-Carburized Gears / T. Tobie, P. Oster, B. Höhn // *Gear Technology*. – 2002. – March/April. – P. 31–38.
13. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів : корисна модель UA 88748 / О.О. Мікосянчик. – Опубл. 25.03.14.
14. Выбор критерия при оценке параметров прочности функционально-градиентных конструкций / Н.О. Кузин [и др.] // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2015. – № 6/1(26). – С. 4–8.

Поступила 11.01.2017

**SELECTION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE SURFACE LAYERS
OF THE STRUCTURE TRIBOSYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT
THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE GRADIENT**

O. MIKOSYANCHIK, B. LYASHENKO, N. KUZIN, A. DUDAN

The practical application of methodology to predict the optimal structure of the surface layers, formed during the operations of tribological conjunction elements, is addressed. The technique is based on the determination of the mean value of surface layers micro-hardness of the material at some local area of deformed by friction contact surfaces up to 80 mkm depth. The possibility of predicting the wear of contact surfaces, under rolling with varying degrees of slipping, from the value of the effective (“Integral”) micro-hardness, taking into account the micro-hardness of the surface of the metal layers in the process of structural adaptability at friction and gradient distribution of micro-hardness depth of the deformable layer is presented. The correlation is established between the wear of tribological conjunction elements and micro-hardness values of both tribosystems surface layers and its gradient distribution and allows to develop practical recommendations for modification of technological modes of elements of friction units.

Keywords: tribosystem, tribocorrosion, surface, correlation, involute profile, tribocontact, wear, pitting corrosion, microhardness.